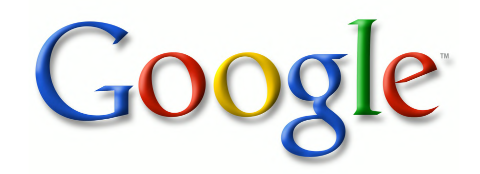
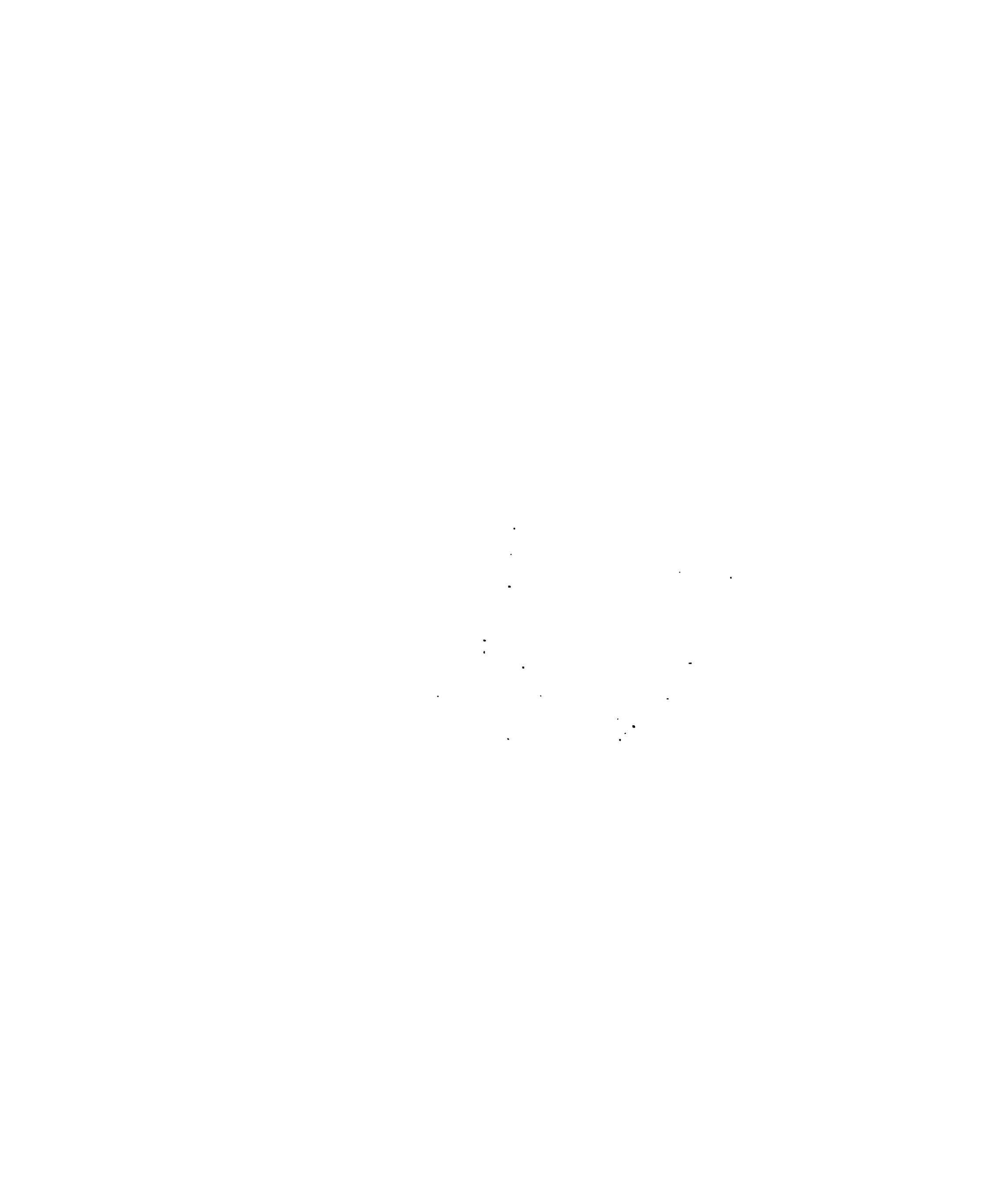
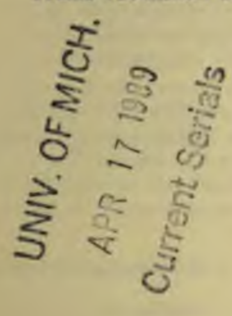




Heft 1
Jahrgang 134
März 1989

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard



Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Für die Anmeldung neuer Mitglieder stellt das Sekretariat der Naturforschenden Gesellschaft (Frau Elisabeth Rufener, Baltenswilerstrasse 28, 8303 Bassersdorf) Formulare zur Verfügung. Jahresbeitrag für Einzelmitglieder Fr. 50.–, für ausserordentliche Mitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 75.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H.H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich)*. – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2400; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042-5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/1: 1–32

Die dreidimensionale Entwicklung eines Hanghochmoores im Toggenburg, Schweiz[1]

Martin Schneebeli, ETH Zürich; Meinrad Küttel,
Fachhochschule Wiesbaden, BRD; Josef Fäh†, Universität Bern

Das im Oberen Toggenburg (Schweiz) gelegene, teilweise abgetorfte Hanghochmoor wurde im Rahmen der Abklärungen seiner Regenerationsmöglichkeiten auf seine Entwicklung pollenanalytisch untersucht.

An einer der tiefsten Stellen des Torfsedimentes wurde ein Bohrkern für das Standardpollenprofil abgeteuft. Diesem Bohrkern wurden im Abstand von 5–10 cm Proben entnommen und die Pollen ausgezählt. Zusätzlich wurden 10 Proben dieses Bohrkerns ^{14}C-datiert. Zur Bestimmung der Ausbreitung und des Wachstums wurden in einem Raster von 50 m Seitenlänge an 43 Stellen Proben in der Grenzschicht zwischen Torf und Lehm entnommen. Zusätzlich wurden entlang zweier Transsekten aus drei Tiefen Proben gezogen. Aufgrund des Standardprofiles konnte für die letzten 10000 Jahre die vegetationsgeschichtliche Entwicklung sowohl des Moores als auch der Region rekonstruiert werden. In den frühen Phasen ergänzen Influxberechnungen die Aussagen des Prozentpollendiagramms.

Die visuelle Gliederung des Pollendiagramms ermöglichte die visuelle Zuordnung der Basis- und Transsektproben zu einer bestimmten biostratigraphischen Zone. In einem zweiten Ansatz wurde die Datierung der Basis- und Transsektproben durch numerische Korrelation versucht. Bei geeigneter Transformation der Ausgangsdaten lassen sich die Proben genauer zuordnen, als dies mit einem visuellen Vergleich möglich ist. Eine Fehlerabschätzung durch Anwendung verschiedener Korrelationsmethoden zeigt, dass sich 90% der Proben innerhalb von ± 880a einordnen lassen.

Die Darstellung dieser Daten in Form von Ausbreitungs- und Wachstumskarten zeigt, dass sich das Moor, von zwei randlich gelegenen Zentren ausgehend, über mehrere Geländestufen hangaufwärts ausgebreitet hat. Obwohl die horizontale Ausbreitung aus geologischen Gründen um 0 n. Chr. abgeschlossen war, lässt sich bis zum Eingreifen des Menschen im 19. Jh. keine Abnahme des vertikalen Wachstums erkennen.

Three-dimensional Development of a Peat Bog on Slope

In connection with the restauration of a peat bog on slope the development of the peat was investigated with palynological methods. The bog is situated in the Upper Toggenburg (Switzerland) and is partially exploited or drained.

A boring core for the reference pollen profile was taken at one of the deepest sites of peat. Every 5 to 10 cm a pollen sample was counted. Additionally 10 samples are radiocarbon dated. To determine growth and spread of the peat on a grid with 50 m side length at 43 sites, samples were taken at the interface between peat and underlying mineral soil and on two transsect in three depths.

[1] Infolge eines tödlichen Unfalles konnte J. Fäh den palynologischen Teil der vorliegenden Arbeit nicht mehr fertigstellen. Er wurde daher von M. Küttel in verdankenswerter Weise übernommen.
Die Untersuchungen wurden durch einen Forschungskredit des Bundesamtes für Forstwesen und Landschaftsschutz, Abteilung Naturschutz, unterstützt. Die ^{14}C-Datierungen wurden durch einen Forschungskredit der ETH Zürich ermöglicht. Den beteiligten Mitarbeitern des Fachbereiches Bodenphysik, ETH Zürich, und des Systematisch-Geobotanischen Institutes der Universität Bern danken wir für ihre Mithilfe.

The history of vegetation of the mire of the past 10,000 years, as well as of the region, could be interpreted by means of the reference profile. Calculation of the pollen accumulation rate enhanced the interpretation in the early phases of development.

The visual stratification of the percentage pollen diagram was used to relate the basis and transsect samples to the biostratigraphical zones. In a second approach the basis and transsect samples are dated through numerical correlation between reference profile and sample. The resulting date was more precise than the visually related sample where the pollen percentages are appropriately transformed. An estimation of error by application of different correlation methods showed that 90% of the samples could be dated within ± 880y.

The dated samples are visualized with maps. The bog has spread from two centres at the edge upward. During this spread it climbed over several steps. Although the horizontal spread ceased about at 0 A.C. because of geological reasons, no decrease of the vertical growth is visible until the 19th century.

1 Einleitung

Hochmoore formen ein sehr eigentümliches Ökosystem, das weitgehend durch autogene Prozesse gesteuert ist (O. Wildi, 1978). Die Durchlässigkeit des Torfkörpers ist durch die unterschiedliche Zersetzung des organischen Ausgangsmaterials bestimmt. Die Form der Mooroberfläche ist deshalb langfristig identisch mit dem Wasserspiegel (H.A.P. Ingram, 1982). Da die meisten Hochmoore in der Schweiz in ihrer natürlichen Entwicklung durch menschliche Eingriffe beeinträchtigt sind (A. Grünig et al., 1986), interessiert sich der Naturschutz dafür, welche Möglichkeiten bestehen, um eine hochmoorähnlichere Vegetation wieder herzustellen (M. Schneebeli, 1988). Das Verständnis für die Entwicklung eines Moores bildet dafür eine wesentliche Grundlage. In der Arbeit von I. Henrion (1982) wird die horizontale Ausbreitung von Sattelmooren im Harz dargestellt. T. Solem (1986) versucht mit ähnlichen Methoden die Ausbreitung eines Deckenmoores in Mittelnorwegen zu rekonstruieren. Diese Arbeiten beschränken sich auf die horizontale Ausbreitung. Das damit zusammenhängende vertikale Wachstum wurde nicht bestimmt. Die vorliegende Arbeit beschreibt die dreidimensionale Entwicklung eines Hanghochmoores.

2 Lage und Geologie des Untersuchungsobjektes

Das Untersuchungsobjekt liegt im Oberen Toggenburg zwischen 1300–1350 m ü. M. Der Untergrund besteht aus Amdenermergel, einem schiefrigen Kalkmergel. Diese Mergel sind meistens durch die lehmig-tonige Grundmoräne des würmeiszeitlichen Rheingletschers überdeckt. Die südlichste, unterste Moräne (Bild 1) soll dem Etzwilen/Zürich/Bazenheid-Stadium entsprechen (R. Hantke, 1967).

Das Moor entwickelte sich auf einer zwischen 3–20% geneigten Hangschulter. Es entwässert natürlich im Westen in den Rotbach, im Osten in zwei Schlucklöcher. Durch Torfabbau und Entwässerungen ist die heutige hydro-

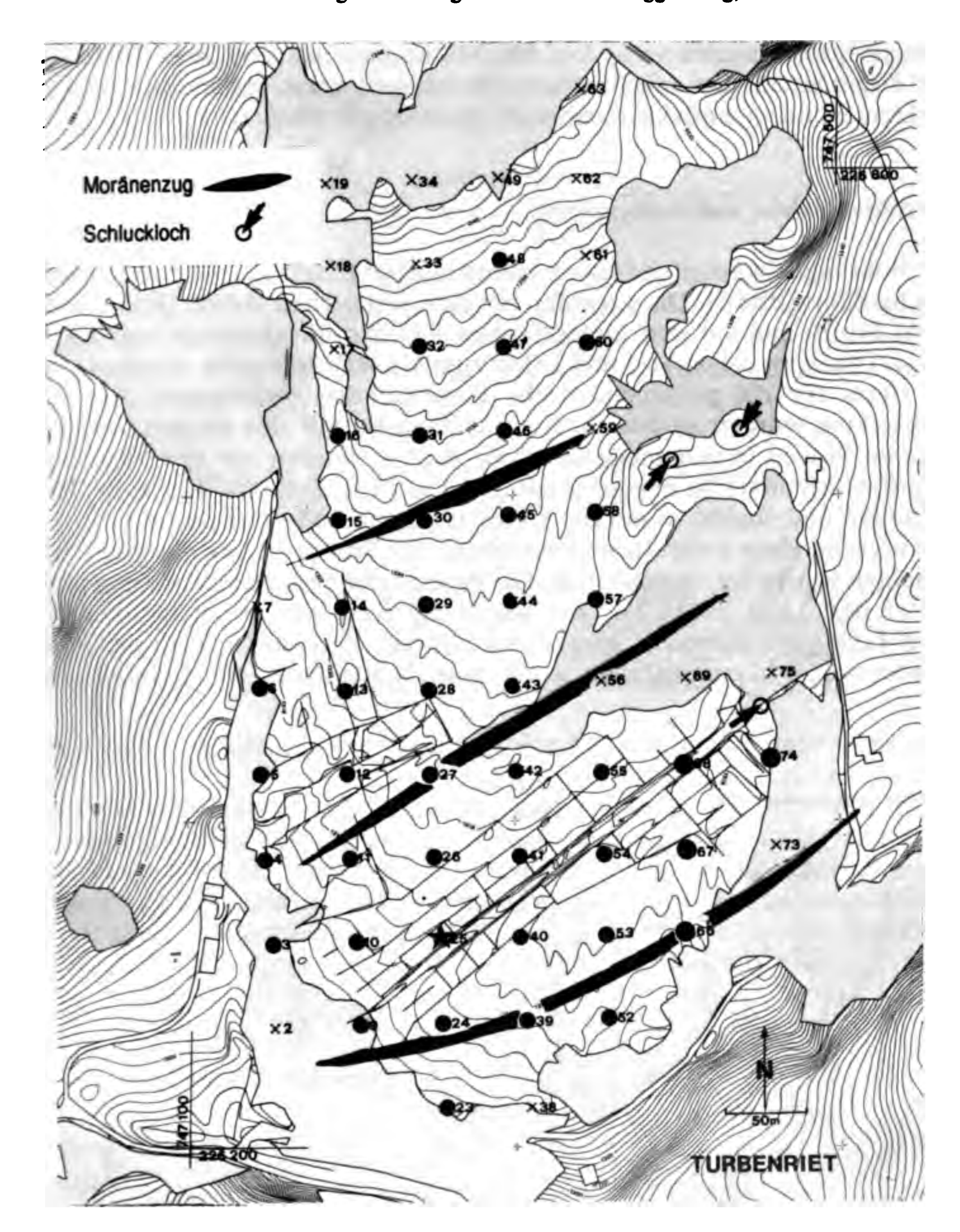


Bild 1 Situation mit Messnetz. Die Stellen, wo Basisproben entnommen wurden, sind mit einem ● bezeichnet. Die Transsekte verlaufen von 4–67 und von 23–32. Das Standardpollenprofil befindet sich bei Punkt 25 (★).

Fig. 1 Map with measuring points and the most important geological features. Samples taken at the basis of peat formation are marked with ●. The transsects go from point 4 to 67 and from point 23–32. The reference pollen profile is located at point 25 (★).

logische Situation stark verändert. Die Mächtigkeit der gebildeten Torfe ist in Bild 2 dargestellt. Die ursprüngliche Mächtigkeit wurde dabei aufgrund von Dichtemessungen zurückgerechnet (M. Schneebeli, 1988).

3 Probeentnahme und Aufbereitung

Die Bohrungen wurden auf einem rechtwinkeligen Netz mit 50 m Seitenlänge durchgeführt (Bild 1). Dazu wurden mit dem Russischen Bohrer (P.D. Moore, 1986) Profile bis auf den mineralischen Untergrund abgeteuft und an der Grenzschicht zwischen Torf und Lehm zwei bis drei Proben im Abstand von 5 bis 10 cm für die pollenanalytische Untersuchung entnommen. Auf zwei Transsekten wurden zusätzlich drei gleichmässig auf den ganzen Bohrkern verteilte Proben entnommen. Sämtliche Proben wurden mit der Flusssäure-Acetolyse-Methode (s. neuere Darstellung in M. Küttel und A. Lotter, 1987) behandelt und zusätzlich mit der Chlorierungsmethode aufbereitet.

Aufgrund einer vorläufigen Auszählung der Proben der mächtigsten Torfschichten wurde der vermutlich älteste Bereich der Sedimentation festgestellt. Dieser liegt beim Punkt 25. Dort wurde ein Kern mit einem modifizierten Streif-Livingston-Bohrer (J. Merkt und J. Streif, 1971) gewonnen, der in Abständen von 5–15 cm analysiert wurde und als Standard- oder Referenzprofil

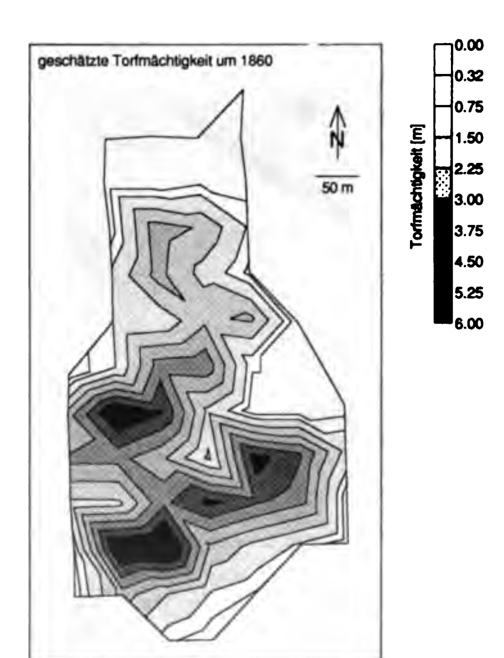


Bild 2 Torfmächtigkeit vor den Entwässerungen und Torfabbau.

Fig. 2 Depth of peat before drainage and excavation.

dient. Die Basisproben wurden auf etwa 400–600 Pollenkörner ausgezählt, diejenigen des Standardprofils auf etwa 800–1000. Die Prozentwerte der Pollen wurden berechnet mit:

$$\% \text{ Pollen p} = \frac{\text{Anzahl Pollen x}}{\Sigma \text{ Baumpollen} + \text{Nichtbaumpollen}} * 100[\%]$$

Bei den Nichtbaumpollen wurden die Cyperaceae ausgeschlossen.

Für die Aufbereitung der Pollenproben wurden 1–2 cm^3 Torf entnommen und dieser Probe eine bekannte Anzahl Lycopodium-Sporen E zugegeben (J. Stockmarr, 1971). Damit berechnet sich die Pollenkonzentration nach der Formel:

$$\text{Konzentration Pollen c} = \frac{\text{ausgezählte Pollen x}}{\text{ausgezählte Pollen e}} * \text{zugegebene Sporen E} \quad [\text{Pollen/cm}^3]$$

Die mittlere Torfablagerung w wurde aus der Steigung der Regressionsgeraden zwischen Torfmächtigkeit und kalibriertem ^{14}C-Alter gefunden (siehe Kapitel 4). Die mittlere Ablagerung w beträgt $0{,}0436 \pm 0{,}0025$ cm/a. Der Polleninflux (oder genauer die Pollenakkumulationsrate) ac beträgt dann:

$$\text{Akkumulationsrate ac} = \text{Konzentration c} * \text{Wachstum w} \ [\text{Pollen/cm}^2\ \text{a}]$$

Das Pollendiagramm wurde in Pollenzonen gegliedert, die als «local pollen assemblage zones» (LPAZ), also als Biozonen im Sinne der stratigraphischen Nomenklatur zu verstehen sind. Um einen regionalen und überregionalen Vergleich zu ermöglichen, ist das Diagramm zusätzlich chronostratigraphisch zoniert worden (Korrelation mit der Gliederung der Holozäns nach J. Mangerud et al. [1974] aufgrund der 10 δ-^{13}C-korrigierten ^{14}C-Daten).

4 Klassifikation und Datierung der Proben

4.1 Das Standardprofil

4.1.1 Lithologie, ^{14}C-Datierung und Biostratigraphie

Die lithologische Abfolge der Schichten ist in Tabelle 1 und Bild 3 dargestellt. Die Sedimentation begann an der Basis (492–510 cm) mit feinklastischem Material. Auf diesem Gley-Boden war der Abbau der organischen Substanz gehemmt und es entwickelte sich zu Beginn ein Niedermoor. Der Hauptteil der Sedimentsäule besteht aus Cyperaceae-Torf, ab 272 cm mit wesentlichem Anteil von Braunmoosen, die dann ab 157 cm von Torfmoosen abgelöst werden.

Tabelle 1 Etwas vereinfachte Lithologie des Standardprofils (H bedeutet Humifizierungsgrad nach von Post)

Table 1 Slightly simplified lithology of the reference profile (H signifies the humification after the scale of von Post)

0–15 cm	Rezent durchwurzelter Eriophorum vaginatum-Torf mit Sphagnum und Makroresten von E. vaginatum; H 1
15–33 cm	Sphagnum-Torf mit Eriophorum vaginatum und Makroresten von E. vaginatum; H 3–4
33–120 cm	Eriophorum vaginatum-Torf mit Sphagnum, Makroresten von Ericaceae-Reisern und vereinzelt Scheuchzeria palustris; H 3 und H 4
120–123 cm	Eriophorum vaginatum-Sphagnum-Torf; H 5
123–157 cm	Eriophorum vaginatum-Torf mit Sphagnum und vereinzelten Makroresten von Carex limosa; H 4 (5–7)
157–272 cm	Eriophorum vaginatum-Braunmoostorf mit wechselnden Anteilen von Eriophorum und Braunmoos, Makroresten von Scheuchzeria palustris, Carex limosa und Ericaceae-Reisern; H (2)–3
272–337 cm	Eriophorum vaginatum-Torf mit vereinzelten Makroresten von Carex limosa, Scheuchzeria palustris, Phragmites australis, Menyanthes trifoliata-Samen, Alnus-Holzstückchen; H 3–(5)
337–398 cm	Eriophorum vaginatum-Torf mit Alnus-Holz und Makroresten von Phragmites australis; H 4–(6)
398–448 cm	Eriophorum vaginatum-Torf mit wechselnden Anteilen an Phragmites und Alnus-Holz; H 4–(5)
448–457 cm	Toniger organischer Detritus mit Makroresten von E. vaginatum; H 5–6
457–465 cm	Übergangshorizont aus stark tonigem organischem Detritus mit Makroresten von E. vaginatum und mit Holz; H 7–8
465–483 cm	Ton mit organischem Detritus und Makroresten von E. vaginatum, dunkelbraun
483–492 cm	Braungrauer Ton mit etwas organischem Detritus
492–510 cm	Graublauer Ton mit etwas Steinchen aus kristallinem Material

Tabelle 2 ^{14}C-Datierungen des Standardprofils Bohrkern G25A

Table 2 ^{14}C-dates of the reference profile of the core G25A

Probentiefe	AMS-Alter a BP	$\delta^{13}C$ ‰	AMS-Alter Korr. a BP	kalibriertes Alter	scheinbare Dichte (Mg/m^3)
33 cm	1570 ± 85	−29,9	1490 ± 95	AD 430–650	0,119
89 cm	1980 ± 80	−22,2	2020 ± 90	BC 170–AD 80	0,110
130 cm	3910 ± 90	−28,1	3760 ± 100	BC 2340–2040	0,106
182 cm	4590 ± 90	−25,7	4570 ± 100	BC 3370–3290	0,108
242 cm	5710 ± 90	−25,6	5700 ± 100	BC 4690–4410	0,119
303 cm	6370 ± 100	−24,8	6370 ± 110	BC 5500–5100	0,138
335 cm	6640 ± 100	−27,4	6600 ± 110	BC 5640–5410	0,167
358 cm	7020 ± 100	−24,4	7030 ± 110	BC 5980–5700	0,175
403 cm	8940 ± 120	−24,5	8950 ± 125	BC ≈ 8000	0,157
462 cm	9810 ± 120	−25,6	9800 ± 125	BC ≈ 9000	

a BP: Jahre vor 1950 AD: nach Christi Geburt BC: vor Christi Geburt

Zehn Proben des Standardprofils konnten ^{14}C datiert werden. Da die Datierung auf dem Beschleunigungs-Massenspektrometer der ETH Zürich vorgenommen wurde (G. Bonani et al., 1986), konnte die Probenmenge auf 1 cm Säulenhöhe beschränkt werden. Zur Datierung wurden nur die Fasern von Eriophorum vaginatum verwendet. Die Resultate der Datierung sind in Tabelle 2 dargestellt.

Das Profil wurde visuell in 12 biostratigraphische Zonen (LPAZ) gegliedert (Tabelle 3). Diese Gliederung entspricht weitgehend derjenigen von J. Fäh (1986), ausgenommen, dass die Zonen 2 und 6 je zwei Subzonen umfassen und die Zonengrenzen stets zwischen zwei Proben gezogen wurden. Die Altersangaben basieren auf den z.T. interpolierten Werten der δ-^{13}C-korrigierten ^{14}C-Analysen. Eine Überprüfung dieser visuellen Gliederung mittels Clusteranalysen und eines Teilungsalgorithmus (H.J.B. Birks und A.D. Gordon, 1985) ergab vergleichbare Resultate.

4.1.2 Vergleich der Biostratigraphie mit der Chronostratigraphie

Die chronostratigraphische Gliederung des Holozäns wird hier im Sinne von J. Mangerud et al. (1974) verwendet. Bereits aus den Altersangaben für die Pollenzonen geht hervor, dass die Grenzen der Pollenzonen mit denen der Chronozonen im allgemeinen nicht übereinstimmen. Dies ist zu erwarten, da ja die dahinter stehenden Gliederungsprinzipien verschieden sind. Vorausgesetzt die ^{14}C-Daten sind reell, d.h. die angegebenen Radiocarbonalter entsprechen dem wahren ^{14}C-Alter der betreffenden Schichten – wir haben keinen Anlass daran zu zweifeln –, so sind folgende Feststellungen zulässig: Die Grenze Pleistozän/Holozän liegt per definitionem bei 10 ka BP, d.h. ist gleichbedeutend mit dem Übergang Jüngere Dryas/Präboreal. Wird nun die ^{14}C-bestimmte Zeit-Tiefen-Beziehung über das unterste ^{14}C-Alter hinaus extrapoliert, so müsste die Grenze Jüngere Dryas/Präboreal bei ca. 480–490 cm liegen, also am Profilende. Hier ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die ^{14}C-Datierungen in diesem Zeitabschnitt problematisch sind (M. Küttel, 1977). Palynostratigraphisch ist unseres Erachtens keine Jüngere Dryas feststellbar. Es fehlt die typische spätglaziale Pollenflora dieser Höhenlage. Sie wäre gekennzeichnet durch mehrere Prozente Artemisia mit Helianthemum, Juniperus u.a. (vgl. H.P. Wegmüller, 1976, Profil Dreihütten nordwestlich Wildhaus auf der vergleichbaren Höhe von 1318 m zwar mit palynostratigraphisch festgestellter Jüngerer Dryas; doch ist diese Interpretation mit anderen Ergebnissen aus dem Schweizer Alpenraum konsistent [M. Küttel, 1988]).

Die Grenze Präboreal/Boreal entspricht ungefähr der Grenze zwischen den LPAZ GAM-2/3, genauer GAM-2b/3. Die Grenze Boreal/Atlantikum ist palynologisch nicht klar erkennbar. Sie müsste ungefähr bei 380 cm liegen, d.h. zwischen dem Ulmus-Maximum und dem Alnus-Anstieg. Ähnlich schwach ausgeprägt ist die Grenze zwischen Atlantikum/Subboreal. Sie liegt bei etwa 210 cm und damit zwischen dem Abies-Rückgang und dem folgenden Alnus-Anstieg. Dieser neuerliche Alnus-Anstieg könnte auf Alnus viridis

beruhen. Das ist jedoch aufgrund fehlender Alnus-Differenzierung nur eine Vermutung. Die Grenze Subboreal/Subatlantikum, definiert mit 2,5 ka BP, entspricht der Grenze zwischen den LPAZ GAM-8/9.

Tabelle 3 Biostratigraphische Gliederung des Standardprofils

Table 3 Biostratigraphical zones of the reference profile

GAM-1 Pinus-Zone: Proben 1–7 (490–464 cm).
Hohe Werte von Pinus, geringe von Corylus, Fehlen der thermophilen Laubbäume, Nichtbaumpollen (NBP) um 20% mit besonders viel Cichoriaceae, dazu bis zu 40% Selaginella selaginoides.
Untere Grenze: Einsetzen der thermophilen Laubbäume.
Alter: ca. 10 ka bis ca. 9,8 ka BP.

GAM-2 Pinus-Corylus-Zone: Proben 8–15 (459–404 cm).
Diese Zone lässt sich in zwei Subzonen gliedern, die aber ebenso begründet als eigene Zonen aufgefasst werden könnten. Die Gliederung in Subzonen wurde wegen des Vergleichs mit der Arbeit von J. Fäh (1986) beibehalten.

GAM-2a Pinus-Corylus-Apiaceae-Subzone: Proben 8–13 (459–424 cm).
Pinus dominiert, geringe, aber kontinuierliche Werte von Ulmus, charakteristisch relativ hohe Werte der Apiaceae, aber auch der Poaceae.
Obere Grenze: Starker Rückgang von Pinus, Anstieg von Corylus und des Quercetum mixtum (QM).
Alter: ca. 9,8 ka bis ca. 9,2 ka BP.

GAM-2b Pinus-Corylus-Betula-Subzone: Proben 14, 15 (414 und 404 cm).
Pinus dominiert, Betula erreicht ein Maximum, Quercetum mixtum, insbesondere vertreten durch Ulmus, legt zu, NBP unter 10%.
Obere Grenze: Schnittpunkt der Kurven von Pinus und Corylus.
Alter: ca. 9,2 ka bis ca. 8,8 ka BP.

GAM-3 Corylus-Quercetum mixtum-Zone: Proben 16–20 (394–359 cm).
Corylus dominiert, subdominant ist Quercetum mixtum (überwiegend Ulmus), Pinus liegt um 10–20%, Betula ist zurückgegangen, der NBP-Anteil ist gering. Gegen Ende der Zone erste Funde von Picea.
Obere Grenze: Schnittpunkt der Kurven von Corylus mit der Summenkurve des Quercetum mixtum.
Alter: ca. 8,8 ka bis ca. 7,1 ka BP.

GAM-4 Quercetum mixtum-Corylus-Alnus-Zone: Proben 21–23 (354–334 cm).
Quercetum mixtum dominiert, Corylus ist zurückgegangen. Charakteristisch ist ein ausgeprägtes Maximum der Alnus-Kurve. Picea nimmt leicht zu. Der NBP-Anteil ist nahezu bedeutungslos, sehr viele monolete Polypodiaceae-Sporen.
Obere Grenze: Verstärkter Anstieg von Picea, Rückgang von Alnus, Beginn der Abies-Kurve, Anstieg der Cyperaceae.
Alter: ca. 7,1 ka bis ca. 6,6 ka BP.

GAM-5 Quercetum mixtum-Corylus-Picea-Zone: Proben 24–28 (329–309 cm).
Quercetum mixtum dominiert zum letzten Mal. Bedeutsam werden Picea und Abies. Die Kurve von Fagus ist fast geschlossen. NBP-Anteil ist weiterhin ohne grössere Bedeutung.
Obere Grenze: Schnittpunkt der Kurven der Summenkurve des Quercetum mixtum mit Picea und Abies.
Alter: ca. 6,6 ka bis ca. 6,4 ka BP.

GAM-6 Picea-Abies-Zone: Proben 29–42 (304–184 cm).
Die Zone wurde in zwei Subzonen unterteilt:

GAM-6a Picea-Abies-Corylus-Subzone: Proben 29–33 (304–214 cm).
Picea dominiert (ausser in der Probe 29; möglicherweise ist dieser Abies-Gipfel jedoch ein Ausreisser), stark schwankende Werte verzeichnet Corylus, subdominant ist QM, geht aber insgesamt allmählich zurück, NBP ist unerheblich.
Obere Grenze: Schnittpunkt der Kurven des QM und von Abies.
Alter: ca. 6,4 ka bis ca. 6,0 ka BP.

GAM-6b Picea-Abies-QM-Subzone: Proben 34–42 (264–184 cm).
Picea dominiert, subdominant ist Abies; Corylus, QM, Pinus und auch Fagus bewegen sich in vergleichbarer Grössenordnung (um 10%). Der NBP ist weiterhin unbedeutend.
Obere Grenze: Anstieg von Fagus, Rückgang von Picea und Abies.
Alter: ca. 6,0 ka bis ca. 4,5 ka BP.

GAM-7 Picea-Abies-Fagus-Zone: Proben 43–48 (174–129 cm).
Noch dominiert Picea. In der Subdominanz wechseln Abies und Fagus ab. Im zweiten Abschnitt der Zone 7 gewinnt der NBP an Bedeutung. Spuren von Urtica und Plantago lanceolata tauchen auf. Vermehrt wurden Sphagnum-Sporen gefunden.
Obere Grenze: Rückgang von Picea, Zunahme von Fagus und des NBP.
Alter: ca. 4,5 ka bis ca. 3,6 ka BP.

GAM-8 Fagus-Picea-Abies-Zone: Proben 49–53 (124–104 cm).
Picea und Fagus wechseln sich in der Dominanz ab, QM liegt konstant unter 10%, Abies erreicht maximal noch 10%.
Obere Grenze: Weitere Abnahme von Picea, Zunahme von Pinus.
Alter: ca. 3,6 ka bis ca. 2,5 ka BP.

GAM-9 Pinus-Picea-Fagus-Zone: Proben 54–56 (99–89 cm).
Pinus nimmt zu und übertrifft in den Proben 55 und 56 sogar Picea. Picea, Fagus und Abies liegen ähnlich hoch. QM ist unbedeutend geworden. Der NBP nimmt nicht kontinuierlich zu.
Obere Grenze: Fagus übertrifft Picea.
Alter: ca. 2,5 ka bis ca. 2,0 ka BP.

GAM-10 Fagus-Picea-Zone: Proben 57–62 (84–34 cm).
Fagus dominiert, Picea ist subdominant; der NBP liegt um 15%. Gegen das Ende der Zone tauchen erste Funde von Cerealia und von Juglans auf; konstant vertreten ist Plantago lanceolata.
Obere Grenze: Schnittpunkte der Kurven von Fagus und Abies.
Alter: ca. 2,0 ka bis ca. 1,4 ka BP.

GAM-11 Picea-Fagus-Abies-NBP-Zone: Probe 63 (24 cm).
Die Probe 63 hat einen intermediären Charakter. Picea übertrifft Fagus, der NBP liegt um 85%.
Obere Grenze: Rückgang von Picea, Fagus und Abies, Zunahme von Pinus und des NBP.
Alter: ca. 1,3 ka BP.

GAM-12 Pinus-Picea-NBP-Zone: 64–66 (14–4 cm).
Die abschliessende Zone ist durch eine Zunahme von Pinus gekennzeichnet, wobei in der letzten Probe allerdings Pinus von Picea übertroffen wird. Besonders kennzeichnend ist der hohe Anteil des NBP; charakteristisch insbesondere Plantago lanceolata und am Ende die Zunahme der Ericaceae.
Obere Grenze: Ende des Profils, d.h. 4 cm unter der heutigen Oberfläche.
Alter: Jünger als 1,3 ka BP.

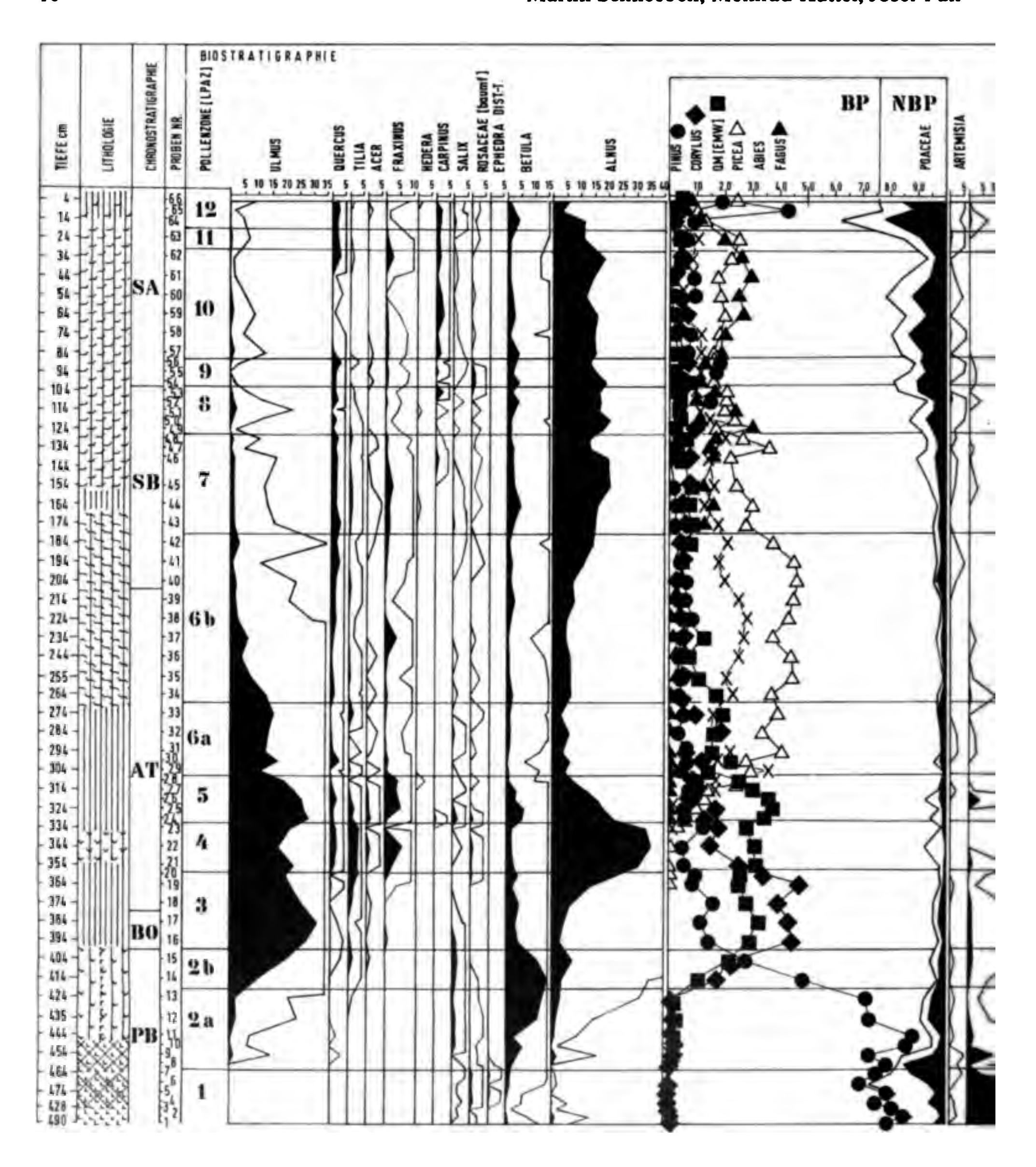
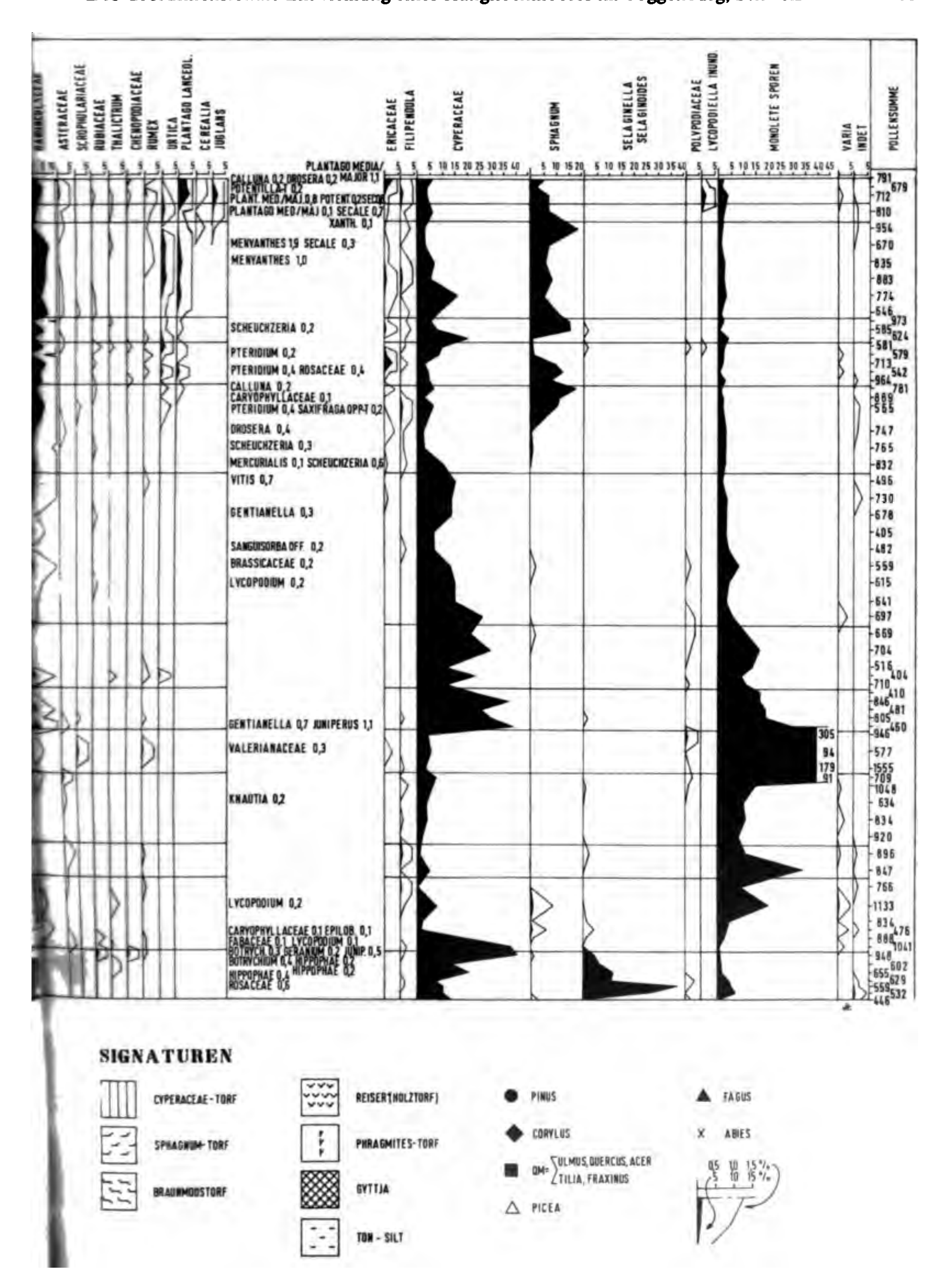
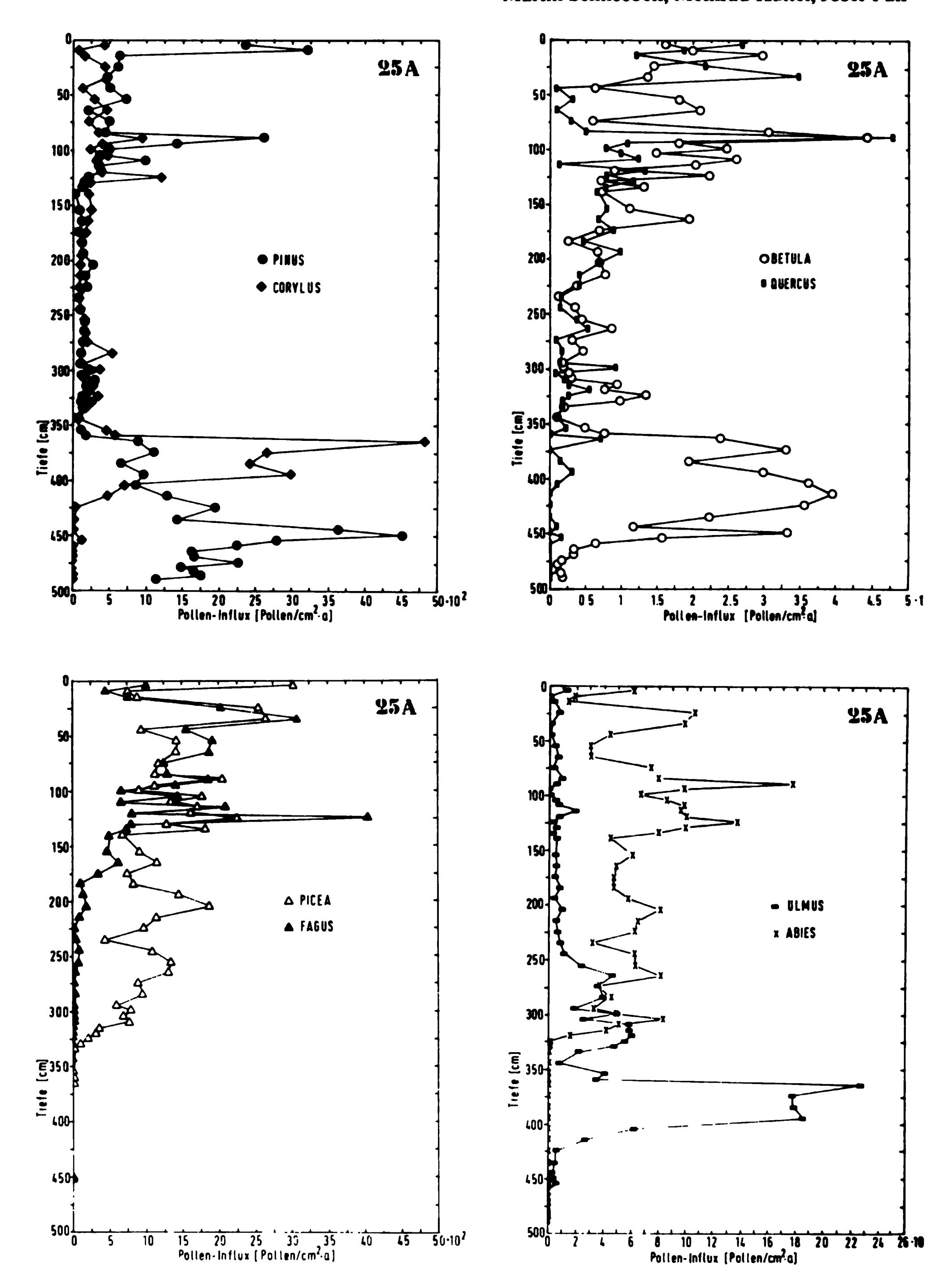


Bild 3 Pollendiagramm des Standardprofils Gamperfin 25A mit Lithologie (Analysen J. Fäh).

Fig. 3 Percentage pollen diagram of the reference profile Gamperfin and its lithology.


ASTERACEAE
SCROPHULARIACEAE
RUBIACEAE
THALICTRUM
CHENOPODIACEAE
RUMEX
URTICA
PLANTAGO LANCEOL.
CEREALIA
JUGLANS
ERICACEAE
FILIPENDULA
CYPERACEAE
SPHAGNUM
SELAGINELLA SELAGINOIDES
POLYPODIACEAE
LYCOPODIELLA INUND.
MONOLETE SPOREN
VARIA
INDET
POLLENSUMME
PLANTAGO MEDIA/MAJOR 1,1
CALLUNA 0,2 DROSERA 0,2
POTENTILLA-T 0,2
PLANT. MED./MAJ. 0,8 POTENT. 0,2 SECOE
PLANTAGO MED/MAJ 0,1 SECALE 0,7
XANTH. 0,1
MENYANTHES 1,9 SECALE 0,3
MENYANTHES 1,0
SCHEUCHZERIA 0,2
PTERIDIUM 0,2
PTERIDIUM 0,4 ROSACEAE 0,4
CALLUNA 0,2
CARYOPHYLLACEAE 0,1
PTERIDIUM 0,4 SAXIFRAGA OPP-T 0,2
DROSERA 0,4
SCHEUCHZERIA 0,3
MERCURIALIS 0,1 SCHEUCHZERIA 0,6
VITIS 0,7
GENTIANELLA 0,3
SANGUISORBA OFF. 0,2
BRASSICACEAE 0,2
LYCOPODIUM 0,2
GENTIANELLA 0,7 JUNIPERUS 1,1
VALERIANACEAE 0,3
KNAUTIA 0,2
LYCOPODIUM 0,2
CARYOPHYLLACEAE 0,1 EPILOB. 0,1
FABACEAE 0,1 LYCOPODIUM 0,1
BOTRYCH. 0,3 GERANIUM 0,2 JUNIP. 0,5
BOTRYCHIUM 0,4 HIPPOPHAE 0,2
HIPPOPHAE 0,2
HIPPOPHAE 0,4
ROSACEAE 0,6
305
94
179
91
791
679
712
810
954
670
835
883
774
646
973
585
624
581
579
713
542
964
781
869
565
747
765
832
496
730
678
405
482
559
615
641
697
669
704
516
404
710
410
846
481
805
460
946
577
1555
709
1048
634
834
920
896
847
766
1133
834
476
888
1041
948
602
655
629
559
532
446
SIGNATUREN
CYPERACEAE-TORF
SPHAGNUM-TORF
BRAUNMOOSTORF
REISER(HOLZTORF)
PHRAGMITES-TORF
GYTTJA
TON - SILT
PINUS
CORYLUS
QM= ULMUS, QUERCUS, ACER, TILIA, FRAXINUS
PICEA
FAGUS
ABIES
0,5 1,0 1,5 %
5 10 15 %


25A
PINUS
CORYLUS
Tiefe [cm]
Pollen-Influx [Pollen/cm²·a]
25A
BETULA
QUERCUS
Tiefe [cm]
Pollen-Influx [Pollen/cm²·a]
25A
PICEA
FAGUS
Tiefe [cm]
Pollen-Influx [Pollen/cm²·a]
25A
ULMUS
ABIES
Tiefe [cm]
Pollen-Influx [Pollen/cm²·a]

4.1.3 Vegetationsgeschichtliche Deutung des Standardprofils

Grundsätzlich ist zwischen der ganz lokalen Vegetationsgeschichte (Moorvegetation) und der regionalen Vegetationsentwicklung zu unterscheiden. Auskunft über die Moorentwicklung geben von den pollenanalytisch nachgewiesenen Taxa vor allem Cyperaceae, Sphagnum, Selaginella selaginoides, Lycopodium inundatum (= Lycopodiella inundata), Ericaceae und Scheuchzeria palustris sowie natürlich auch die Sippen, von denen Grossreste gefunden wurden. Dazu gehören namentlich Eriophorum vaginatum, Sphagnum, Ericaceae, Scheuchzeria palustris, Carex limosa, Menyanthes trifoliata und Phragmites australis. Basierend darauf lässt sich folgende Entwicklung skizzieren:

Im frühen Präboreal beginnt die Moorentwicklung als Sumpf mit dem Scheidigen Wollgras. Der Dornige Moosfarn dürfte auch weit verbreitet gewesen sein. Anderseits ist aber ebenso denkbar, dass der relativ grosse Anteil des Moosfarns auf selektive Zerstörung (z. B. mikrobieller Abbau) zurückzuführen ist (A.J. Havinga, 1967).

Allmählich entwickelte sich der Sumpf zu einem Niedermoor und dann zu einem Übergangsmoor, auf dem auch Gehölze wuchsen. So wurde Erle bei 317–321 cm nachgewiesen. Der Holzanteil im Sediment ist allerdings ganz unterschiedlich (siehe Tabelle 1). Im weiteren Verlauf der Entwicklung ist der Nachweis von Samen des Fieberklees im Atlantikum interessant. Pollen wurden im Gegensatz dazu nicht gefunden. Der Fieberklee wächst halbsubmers und zeigt an, dass mindestens zeitweilig Wasserflächen vorhanden waren. Wahrscheinlich fand sich bereits eine Differenzierung in Bulten und Schlenken. Typisch für Übergangsmoore sind Schlamm-Segge und die Blumenbinse, die beide nachgewiesen werden konnten. Das Stadium des Übergangsmoores dauerte relativ lange, nämlich bis ins Frühe Subboreal. Von da weg ersetzen Torfmoose die Braunmoose und das Übergangsmoor wird zu einem Hochmoor, in dem wesentlich die ganze Zeit über auch Ericaceae von Bedeutung waren. Die Ericaceae-Kurve zeigt zwei stark ausgeprägte Maxima. Das erste um etwa 3,2 ka BP stimmt mit einer längerdauernden Phase allgemeiner klimatischer Ungunst in den Zentralalpen überein. Das zweite Maximum ist subrezent. Etwas Ähnliches lässt sich im Diagramm Dreihütten (H.P. Wegmüller, 1976) finden.

Anders verlief natürlich die grossräumige Entwicklung. Hier ist zuerst auf die grundsätzliche Problematik der Deutung von Pollendiagrammen im Gebirgsraum hinzuweisen. Das betrifft in erster Linie den bekannten vertikalen

---

◀ **Bild 4** Polleninfluxdiagramme des Standardprofils 25.
Föhre und Hasel; Birke und Eiche; Fichte und Buche; Ulme und Weisstanne.

Fig. 4 Diagram of pollen accumulation rate at the reference profile 25.
Pinus sp. and Corylus avellana; Betula sp. and Quercus sp.; Picea excelsa and Fagus silvatica; Ulmus sp. and Abies alba.

Pollentransport, insbesondere des Baumpollens und die dadurch bedingte Verfälschung der Abbildung der Höhenstufen (V. Markgraf, 1980). Ein weiteres Problem ist die Relativberechnung. Gemeint ist damit, dass z. B. eine bestimmte Baumart, im untersten Abschnitt etwa die Föhre, sich auf Flächen ausbreitet, die noch vegetationsfrei sind. Dadurch wird die Krautvegetation absolut gesehen nicht zurückgedrängt, relativ jedoch schon. An diesen Vorgang ist besonders in der LPAZ GAM-2a zu denken.

Trotz dieser Vorbehalte, die im wesentlichen die basalen Abschnitte betreffen, möchten wir folgende regionale Vegetationsentwicklung interpretieren:

Die Föhre wird im Frühen Präboreal die Gegend erreicht und sich im Mittleren Präboreal gefestigt haben. Gegen Ende Präboreal kommt als wesentlicher Anteil noch die Birke hinzu. Ob diese Deutung wirklich so zutrifft, wissen wir jedoch nicht, denn genauer betrachtet ist das Birkenmaximum um 414 cm nicht verständlich. In heutigen Föhren-Birkenwäldern breitet sich bei Sukzessionen die Birke nicht nur schneller aus, sondern wird auch früher mannbar. Übertragen würde das bedeuten, dass der Birkengipfel eigentlich vor das Föhren-Maximum gehörte, wie es im Diagramm Dreihütten (H.P. Wegmüller, 1976) der Fall ist. Die Influxberechnungen zeigen (Bild 4) erstens ein gleichzeitiges Maximum von Birke und Föhre bei ca. 450 cm, und zweitens, dass die sehr hohen Föhren-Prozentwerte an der Basis auf die Relativberechnung zurückzuführen sind.

Der Föhren-Birkenwald wird dann im Frühen Boreal von einem Laubmischwald abgelöst, der vor allem aus Lichtholzarten wie der Ulme bestand. Haselsträucher waren weit verbreitet. Bemerkenswert ist das Influxmaximum nach dem Prozentmaximum. Der erwähnte Waldtyp hat das gesamte Boreal bis weit ins Frühe Atlantikum überdauert. Doch dann macht sich bereits das allmähliche Einwandern der Fichte bemerkbar, deren Kurve eigentlich sehr schön sigmoidal verläuft. Zuerst findet sich eine Lag-Phase, dann ein schnelles Wachstum und eine abschliessende Stabilisierung. Vergleichsweise ähnlich, doch in der Dominanz geringer, verhält sich die Weisstanne. Die Fichte trifft hier, wie zu erwarten war, vor der Weisstanne ein. Allerdings ist der zeitliche Unterschied in der verstärkten Ausbreitung gering. Es sind rund 200 Jahre. Im Profil Dreihütten (H.P. Wegmüller, 1976) steigt zuerst die Weisstanne an, wird dann jedoch von der Fichte überholt. Wegmüller vermutet allerdings in diesem Bereich eine Sedimentlücke.

Vom Atlantikum bis ins Frühe Subboreal ist Gamperfin ein Fichten-Tannengebiet. Während dieser Zeit ist von einem menschlichen Einfluss nichts zu sehen.

Eine neuerliche Umgestaltung des Waldbildes ergibt sich durch die Einwanderung der Buche, deren erster Pollen zwar bereits um 6,6 ka BP nachzuweisen ist. Sie vermag sich aber sehr lange nicht durchzusetzen. Erst ab 4,5 ka BP erreicht sie einen Anteil, der ähnlich gross ist wie der der Weisstanne. Dies ist eigentlich merkwürdig, tauchen doch gerade Buche und Weisstanne zur selben Zeit auf. Die Buche steigt zulasten von Fichte und Weisstanne an.

Gleichzeitig setzt die kontinuierliche Kurve der Torfmoose ein. Eine mögliche Klärung des Einwanderungsverhaltens der verschiedenen Baumarten läge in der Beantwortung der Frage, wer sich eigentlich in der LPAZ GAM-5 gegen wen und auf welchem Untergrund hat durchsetzen können.

Die LPAZ GAM-8 und GAM-9 sind vegetationsgeschichtlich schwierig zu deuten. Hauptbaumarten sind immer noch Fichte, Buche und Weisstanne. Es handelt sich also um Mischwälder im obermontan-subalpinen Übergangsbereich. In GAM-9 kommt wesentlich noch die Föhre hinzu, möglicherweise wuchs sie auf dem Moor. Bemerkenswert sind die jetzt vorhandenen Sippen, wie Brennessel und Spitzwegerich, die einen Einfluss des Menschen bezeugen. Etwas klarer sind die Verhältnisse in der Zone GAM-10, die ins Frühe Subatlantikum gehört. Hier dominiert eindeutig die Buche über die Fichte. Die Weisstanne hingegen ist stark zurückgegangen. Grossflächige Rodungen sind wie bei Dreihütten (H.P. Wegmüller, 1976) nicht auszumachen. Im jüngsten Abschnitt hat das waldfreie Areal leicht zugenommen, aber auch die Föhre.

4.1.4 Statistische Analyse des Standardprofils

Wird der zeitliche Verlauf der verschiedenen Pollentypen (Pollensequenzen) zur Datierung von Pollenproben unbekannten Datums verwendet, stellt sich die Frage, ob die Sequenz eine eindeutige Funktion darstellt. Die Eindeutigkeit wird in dem Sinne verstanden, dass sich die Proben nur über einen engen Bereich ähnlich sind, der symmetrisch um den wahrscheinlichsten Ort der Probe liegt. Bei multivariaten Daten, wie sie Pollensequenzen darstellen, kann eine visuelle Beurteilung der Eindeutigkeit schwierig sein. Durch Berechnung geeigneter Ähnlichkeitsmasse aus den Pollenprozentwerten kann die Frage beantwortet werden. Zur Illustration wurden Ähnlichkeitsmasse (siehe Anhang B) zwischen Probe 4 bzw. 9 und zwei Teilsequenzen berechnet. Alle zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der Zusammenhang mit der Jungen Sequenz (Proben 9–14) ist hoch, wesentlich kleiner ist er mit der alten Sequenz (Proben 435–469). Einen ganz anderen Verlauf zeigt Probe 9 (Bild 5). Die verschiedenen Ähnlichkeitsmasse unterscheiden sich deutlich. Der lineare Korrelationskoeffizient r (auch Pearson's r genannt) von Probe 9 ist den alten Proben

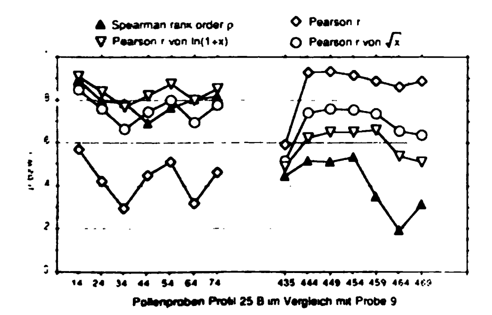


Bild 5 Vergleich verschiedener Ähnlichkeitsmasse am Standardprofil.

Fig. 5 Comparison of different similarity measures at the reference profile.

444–469 am ähnlichsten. Damit zeigt sich, dass der Korrelationskoeffizient der Originaldaten wenig geeignet ist, um eine Probe in das Standardprofil einzuordnen. Die Ursache dafür liegt in seiner hohen Empfindlichkeit gegen Ausreisser (in diesem Fall Pinus-Pollen). Der Einfluss der Ausreisser kann nun vermindert werden, indem die Originaldaten x zu transformierten Daten z transformiert werden. Dazu werden auf die Originaldaten x z. B. die Transformationen

$$z = \sqrt{x} \quad \text{(Wurzeltransformation)}$$
$$z = \ln(1 + x) \quad \text{(Logarithmustransformation)}$$
$$z = \text{Rang}\{x\} \quad \text{(Rangierung)}$$

angewandt. Es bestehen keine Kriterien, welche dieser Operationen die beste Transformation ist. Die Betrachtung des Histogramms der als typisches Beispiel genommenen Hasel-Pollen (Bild 6) legt nahe, dass zumindest in diesem Fall ein möglichst symmetrisches Histogramm ein gutes Kriterium ist. Es ist eine in einem gewissen Masse willkürliche Entscheidung, wie die Bedeutung der Robustheit (erreicht durch Rangierung) gegenüber höherem Informationsgehalt gewichtet werden soll.

Aus allen diesen transformierten Datensätzen lässt sich nun wieder ein Korrelationskoeffizient berechnen. Bild 5 zeigt nun, dass derart transformierte Daten die erwartete Abfolge wiedergeben.

Es zeigt sich damit, dass eine effiziente Transformation die Zuordnung der Basisproben entscheidend beeinflussen kann. Es mag vor diesem Hintergrund erstaunen, dass Transformationen zwar in H.J.B. Birks und A.D. Gordon (1985) erwähnt werden, jedoch kaum auf ihre Bedeutung eingegangen wird.

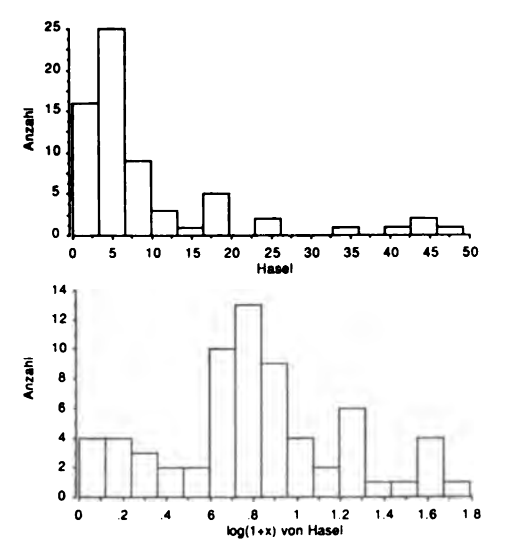


Bild 6 Histogramm der originalen und transformierten Prozentwerte von Hasel.

Fig. 6 Histogram of the original and transformed percentage values of Corylus avellana.

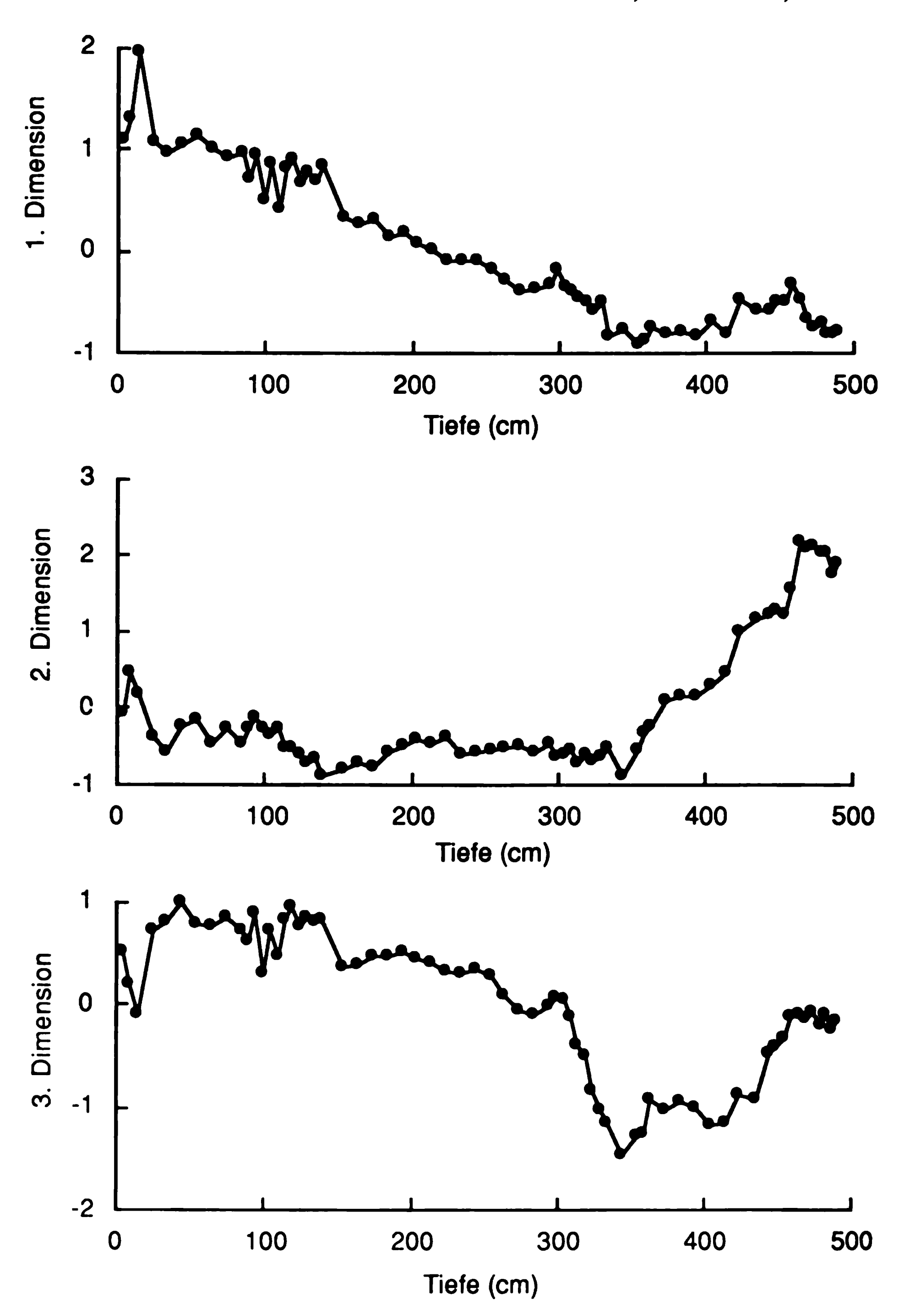
Der Zusammenhang zwischen Verteilungsfunktion und Ähnlichkeitsmass wird hingegen in A. Tarantola (1987) klar herausgearbeitet. Es folgt daraus, dass der lineare Korrelationskoeffizient nur für normalverteilte Datensätze günstig ist. In unserem Falle wird eine symmetrische Verteilung näherungsweise durch die logarithmische Transformation erreicht, die auch für die folgenden Untersuchungen verwendet wird. Um die Eindeutigkeit des Standardprofils zu klären, wurde nun der transformierte Datensatz mit den 70 häufigsten Arten durch eine Hauptachsentransformation mit dem Ähnlichkeitsmass linearer Korrelationskoeffizient in seiner Dimension reduziert (O. Wildi, 1986). Die ersten drei Dimensionen (Bild 7) erklären dabei rund 36% der Varianz. Die erste Dimension (erklärte Varianz 16%) zeigt einen deutlichen Trend zwischen 4 bis 350 cm. Genau umgekehrt liegt die zweite Achse (erklärte Varianz 12%). Sie zeigt einen deutlichen Trend zwischen 350 und 490 cm. Nur noch wenig neue Information zeigt die dritte Dimension (erklärte Varianz 8%). Ihr Minimum liegt bei etwa 340 cm und steigt danach in beiden Richtungen wieder an. Aufgrund dieser Darstellung lassen sich folgende Schlüsse ziehen: eine gute Zuordnung der Basis- und Transsektproben wird aufgrund des deutlichen Trends in der 2. Dimension zwischen 340 und 490 cm möglich sein. Dies dürfte im allgemeinen auch für den Bereich zwischen 4 und 350 cm gelten. Der Trend ist jedoch ziemlich flach. Die Koeffizienten der 1. Dimension der Bereiche 100 bis 150 cm und 280 bis 320 cm schwanken stark. In diesen Bereichen ist somit eine Zuordnung wenig sicher. Sind die Proben über eine Länge autokorreliert, welche grösser als die Probendistanz ist, so lässt sich die Information dieser Reihe verbessern, indem ein gewichtetes, gleitendes Mittel berechnet wird. Dazu wurden die Variogramme (siehe Anhang A) der Koeffizienten der 1. Dimension und deren Differenzen berechnet (Bild 8). Die normalisierte Semivarianz der Koeffizienten wird durch den Trend dominiert. Wird der Trend entfernt, was mit den Differenzen[2] erreicht wird (C. Chatfield, 1984), verhalten sich die Koeffizienten unabhängig. Die Probenabstände sind somit zu weit auseinander, um Schwankungen der Pollensedimentation innerhalb des Trends zu erfassen.

4.2 Basisproben und Transsekte

4.2.1 Zuordnung der Basis- und Transsektproben zur biostratigraphischen Gliederung mittels visuellem Vergleich

Die Basisproben wurden zum einen aufgrund eines visuellen Vergleichs in die verschiedenen Pollenzonen eingestuft. Dasselbe Verfahren wurde bei den Proben aus den verschiedenen Tiefen der Rasterpunkte, die zusammen die beiden Transsekte bilden, angewendet. Die Einstufung basiert auf den Pollentypen, die regional von Bedeutung sind. Das sind nahezu ausschliesslich

[2] Da kein Modell ohne systematische Abweichungen für den Trend gefunden wurde, mussten die Differenzen genommen werden.



1. Dimension
2
1
0
-1
0
100
200
300
400
500
Tiefe (cm)
2. Dimension
3
2
1
0
-1
0
100
200
300
400
500
Tiefe (cm)
3. Dimension
1
0
-1
-2
0
100
200
300
400
500
Tiefe (cm)

Baumpollen. Kriterien, die verwendet werden konnten, waren: 1. Vorkommen (resp. Fehlen) eines oder mehrerer Taxa, 2. Dominanzen, 3. Kombinationen. Das Pollendiagramm des Süd-Nord-Transsektes ist in Bild 9 dargestellt. Die mit dem visuellen Vergleich erzielten Zonen decken sich weitgehend mit derjenigen der numerischen Datierung und prinzipiell mit derjenigen von J. Fäh (1986).

4.2.2 Datierung mittels numerischer Methoden

Die Datierung der Proben aufgrund des visuellen Vergleichs erfolgt innerhalb biostratigraphischer Zonen. In Kapitel 4.1.4 wurde dargelegt, wie die Eindeutigkeit einer Pollensequenz überprüft werden kann. Ist diese Eindeutigkeit nachgewiesen, lassen sich nun Ähnlichkeiten auch für Pollenproben ausserhalb des Standardprofils berechnen. Das Maximum des Ähnlichkeitsmasses legt ein wahrscheinliches relatives Alter dieser Probe fest. Je nachdem wie schnell sich die Pollenzusammensetzung ändert, ist dieses Maximum mehr oder weniger deutlich ausgeprägt. Beispiele für verschieden alte Proben sind in Bild 10 dargestellt. Für die Berechnungen wurden dabei nur Pollentypen von Pflanzen verwendet, welche nicht im Moor wachsen (mögliche Ausnahme: Pinus). Das Maximum der logarithmisch transformierten Prozentwerte wurde mit vier verschiedenen Methoden bestimmt: Pearson Korrelationskoeffizient, gleitendes 5-Punkt-Mittel von Pearson, Spearman Korrelationskoeffizient und gleitendes 5-Punkt-Mittel von Spearman. Der Verlauf dieser vier Ähnlichkeitsmasse ist in Bild 11 dargestellt. Auffallend ist der zakkige Verlauf des Spearman-Koeffizienten und die allgemein höheren Maxima des Pearson-Koeffizienten. Das höhere Maxima rührt vom höheren Informationsgehalt dieses Ähnlichkeitsmasses her. Der Verlauf der Kurven in den verschieden alten Proben bestätigt die aufgrund der Hauptachsentransformation gezogenen Schlüsse: die ältesten Proben lassen sich sehr gut datieren, schwieriger ist dies bei den jüngeren Proben (Bild 7).

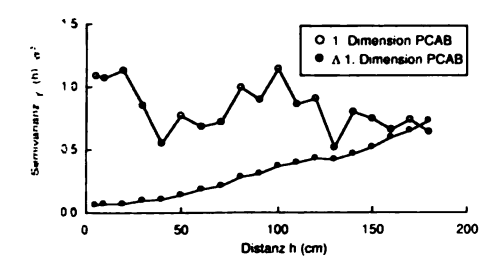


Bild 8 Semivariogramm der 1. Dimension der Hauptkomponentenanalyse und Semivariogramm der Differenzen Δ der 1. Dimension.

Fig. 8 Semivariograms of the first dimension of the PCA transformed coefficients and the differences Δ of it.

◀ Bild 7 Koeffizienten der ersten 3 Dimensionen des hauptachsentransformierten Standardprofils.

Fig. 7 Coefficients of the first 3 dimensions of the principal component transformation (PCA) (reference profile 25).

TRANSEKT PT. 23-32

PROBEN-NR.	RASTER-PT.	TIEFE (cm)
550	23	35
551		40
552		45
553	24	32
554		64
555		96
556		119
557		123
558		127
	25a	s. Standarddiagramm
566	27	36
567		72
568		98
569		139
570		144
571		149
572	28	96
573		192
574		288
575		380
576		390
577	29	94
578		188
579		282
580		365
581		375
582		385
583	30	24
584		48
585		88
586		93
587		98
588	31	64
589		128
590		192
591		254
592		258
593	32	70
594		140
595		210
596		260
597		270
598		280

10 20 30 40 50 60 70 80 90 % — BP — NBP

Bild 9 Vereinfachte Pollendiagramme von Transsekt 23–32 (S-N-Transsekt)

Fig. 9 Reduced percentage pollen diagrams of transsect 23–32 (S-N-transsect)

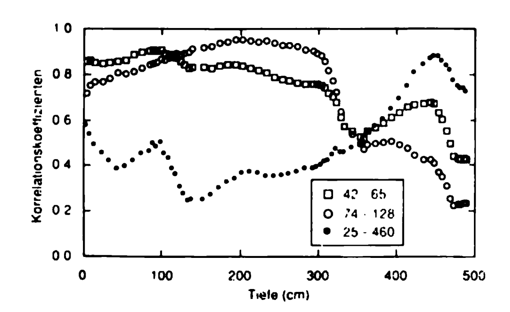


Bild 10 Korrelationskurven dreier verschieden alter Proben (Korrelationsmass: gleitendes Mittel Pearson).

Fig. 10 Diagrams of correlation coefficients of three samples with different ages.

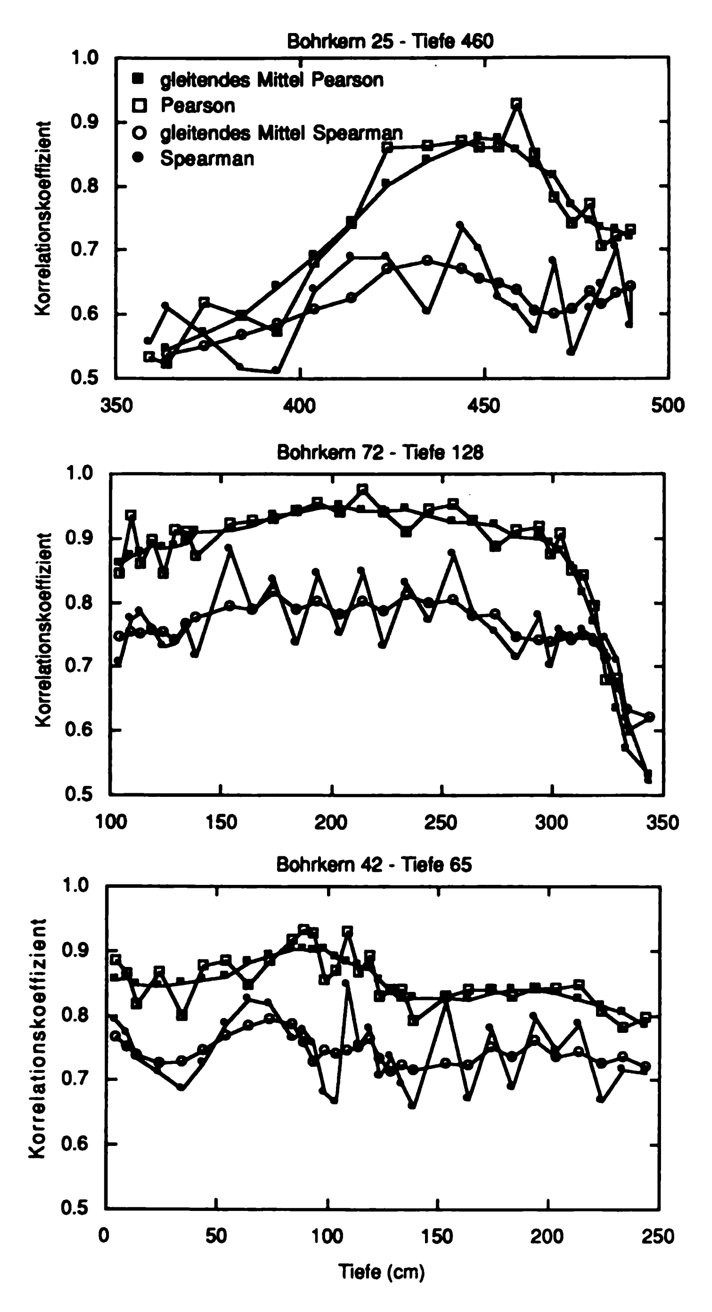
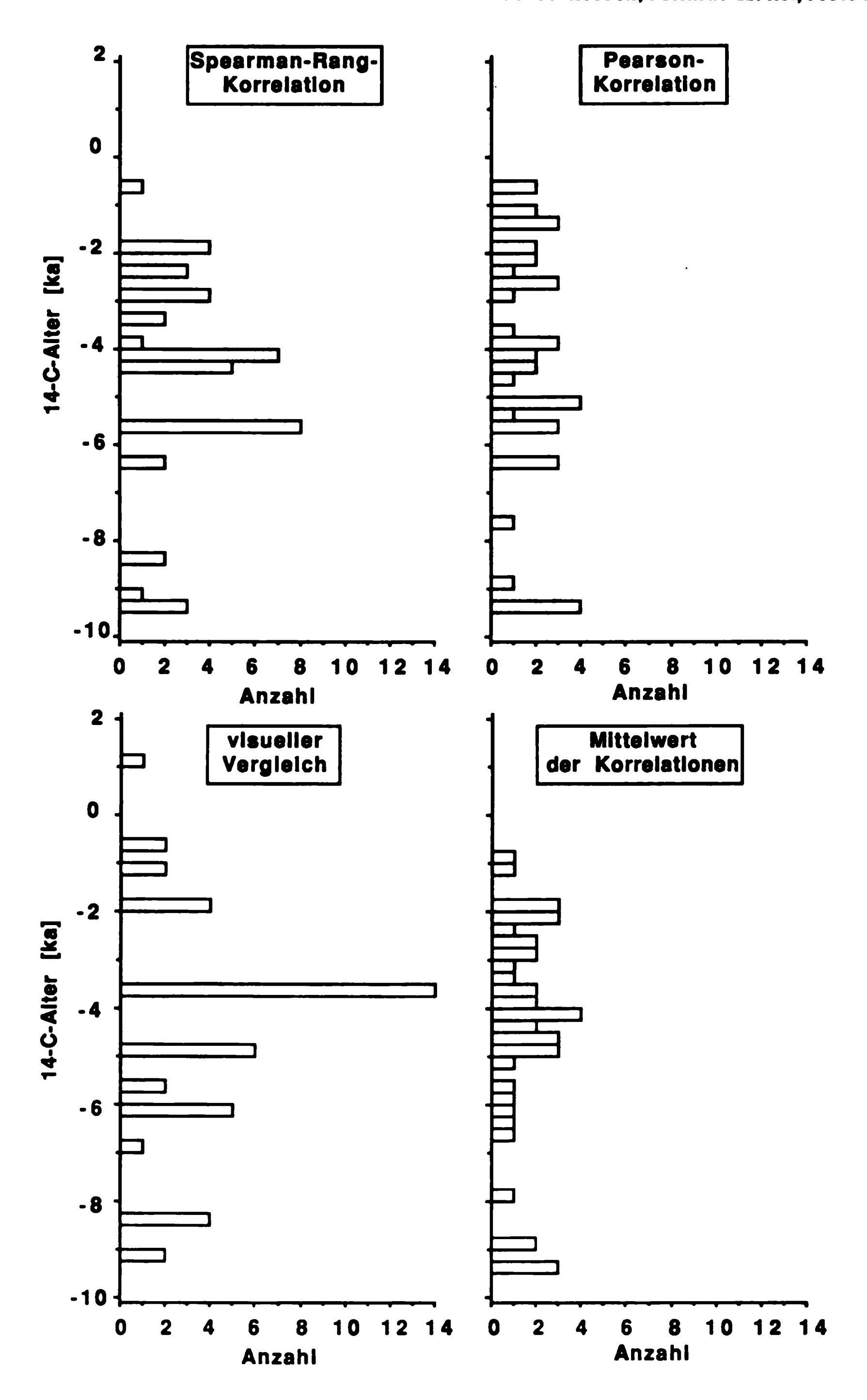


Bild 11 Vergleich der vier Ähnlichkeitsmasse verschieden alter Proben. Zur deutlicheren Darstellung ist nur der Bereich mit hoher Korrelation dargestellt.

Fig. 11 Comparison of four similarity measures of samples with different age.


Spearman-Rang-Korrelation
Pearson-Korrelation
visueller Vergleich
Mittelwert der Korrelationen
14-C-Alter [ka]
Anzahl
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
0 2 4 6 8 10 12 14

Bei den Transsektproben ist noch mehr Information enthalten: die Abfolge des Alters ist festgelegt. Da der Massstab zwischen den Proben ungleichmässig ist, kann jedoch nur eine Rangbeziehung festgelegt werden. Die Proben liegen nun zuwenig dicht, um sie für eine Minimierung ausnützen zu können, da die Maxima der Korrelationen schon in der richtigen Reihenfolge liegen. Das «sequence slotting» (H.J.B. Birks und A.D. Gordon, 1985) ist deshalb nicht anwendbar.

Der Informationsgehalt der verschiedenen Methoden kann geschätzt werden, indem ein Histogramm der datierten Proben gezeichnet wird und die Feinheit der Auflösung des Zeitmassstabes betrachtet wird (Bild 12). Der Mittelwert der Korrelationen zeigt dabei die feinste Auflösung, gefolgt vom Korrelationskoeffizienten, dem Rang-Korrelationskoeffizienten und dem visuellen Vergleich.

Die Genauigkeit der Zuordnung der Proben wurde mit der durchschnittlichen Abweichung (A. Linder und W. Berchtold, 1979) des aus den vier numerischen Methoden gewonnenen Mittelwertes abgeschätzt (Bild 13). Von den 87 für die Datierung verwendeten Basis- und Transsektproben liegen 50% innerhalb von ± 0,44 ka, 90% innerhalb von ± 0,88 ka. Die maximale Abweichung ist 0,121 ka. Die Basisproben lassen sich genauer datieren als die Transsektproben. Das 50%-Percentil liegt bei den Basisproben bei ± 0,41 ka, bei den Transsektproben bei ± 0,51 ka.

Die feinere Auflösung der numerischen Verfahren, wie sie in Bild 12 dargestellt ist, ist also kein Artefakt: die geschätzten Fehler der numerischen Methoden sind etwa halb so gross wie die Abstände der Klassen des visuellen Vergleichs.

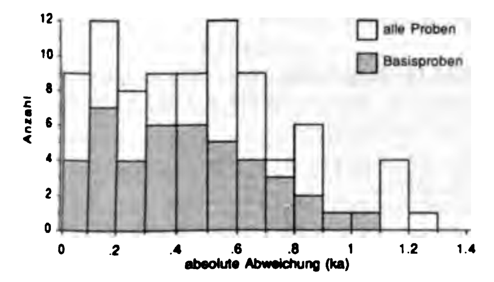


Bild 13 Fehlerabschätzung der numerischen Datierung.

Fig. 13 Estimation of error of the numerical dating method.

◄ Bild 12 Informationsgehalt der verschiedenen Datierungsmethoden.

Fig. 12 Content of used information with different dating methods.

5 Moorentwicklung

5.1 Die Sedimentation des Torfes im Standardprofil

Der Zuwachs von Torf verlief ziemlich gleichmässig in zwei schwach S-förmigen Bögen. Eine lineare Regression der Höhe der Proben mit den 10 ^{14}C-Altern und der Oberfläche ergab einen Korrelationskoeffizienten r von 0,988. Die Werte liegen innerhalb des 99%-Vertrauensintervalls für das wahre Mittel des ^{14}C-Alters (Bild 14). Die Alters-Tiefen-Beziehung ist also sehr deutlich linear. Dieses Ergebnis steht damit im Gegensatz zu den bei R.S. Clymo (1984) dargestellten Regressionen. Die lineare Beziehung deutet darauf hin, dass die Abbaurate des Torfes sehr viel kleiner sein muss, als sie Clymo in finnischen und dänischen Hochmooren fand[3].

Das Alter der Proben im Standardprofil lässt sich nun aufgrund der Regression berechnen. Die Regressionsgerade mit der Gleichung

$$y\ (\text{ka}) = -8{,}933 + 0{,}022 * x\ (\text{cm})$$

beschreibt den Zusammenhang zwischen Höhe der Probe und Alter. Diese Gleichung wurde ebenfalls benutzt, um die Proben der Transsekte zeitlich einzuordnen.

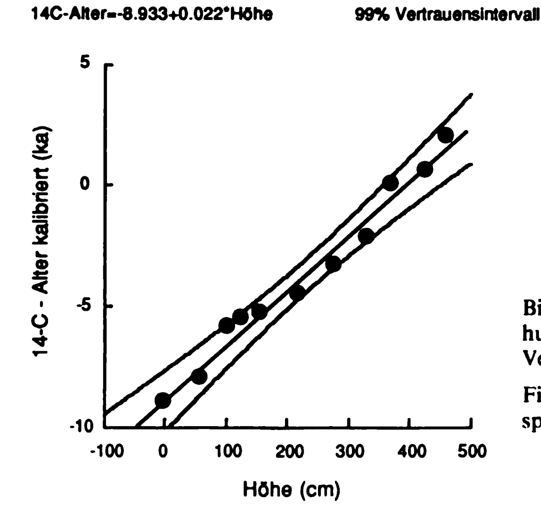


Bild 14 Regression der Höhe-Alters-Beziehung (^{14}C-Alter = −8,933 + 0,022 * Höhe, 99% Vertrauensintervall).

Fig. 14 Regression of the height-age correspondence.

[3] Vergleichsweise wurde die Regression auch mit der kumulierten Sedimentationsrate durchgeführt. Die dabei berücksichtigte scheinbare Dichte des Torfes führte zu keiner wesentlichen Änderung des Korrelationskoeffizienten, die Beziehung blieb linear. Die Form der Kurve gleicht den bei R.S. Clymo (1984, Bild 13) dargestellten englischen Mooren Featherbed Moss und Scaleby Moss. Für diese führte er jedoch keine Regressionen durch.

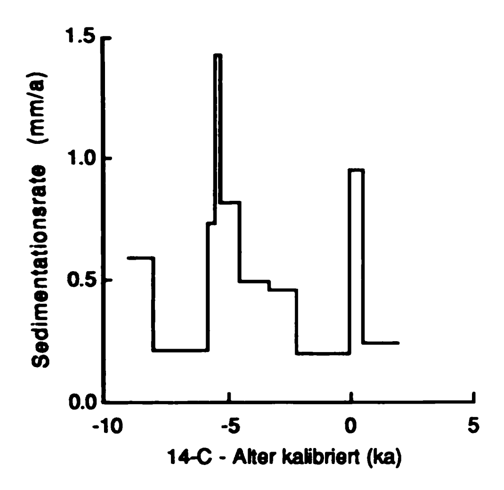


Bild 15 Sedimentationsrate im Standardprofil 25.

Fig. 15 Sedimentation rate at the reference profile 25.

Die Sedimentationsrate schwankte zwischen 0,2 und 1,5 mm/a (Bild 15). Die Geschwindigkeit der Torfsedimentation war somit sehr unterschiedlich, Phasen geringen Wachstums wechselten mit Phasen raschen Wachstums ab. Die Auflösung der ^{14}C-Daten lässt allerdings nur die grössten Schwankungen erkennen. Zumindest zwei Maxima zeichnen sich deutlich ab: eines um 5000 v.Chr. und um das Jahr 0.

5.2 Ausbreitung und Wachstum des Moors

Die Höhenlinien des Mineralbodens des Hanghochmoores sind in Bild 16 dargestellt. Sie zeigen die Form des Geländes vor Beginn der Torfbildung. Auffallend sind die flacheren Gebiete im südlichen und mittleren Teil des Moores. Nach Westen laufen diese Verebnungen in talförmige Strukturen aus, die wiederum kleine Ebenen bilden. Die oben anschliessenden Hänge sind recht gleichförmig.

Die Betrachtung der Ausbreitungskarte (Bild 17a)[4] überrascht nun; das Moor begann nicht auf den grösseren Ebenen zu wachsen, sondern in den kleinen. Nachdem die Moore die Schulter der höheren Ebenen erreicht hatten, breiteten sie sich weiter aus. Die grösste Ausbreitungsgeschwindigkeit wird später erreicht als die grösste Sedimentationsrate im Standardprofil. Zwischen 5000 bis 1000 v.Chr. beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa 2 ha/ka (Bild 12). Die Ausbreitung des Moores erfolgte dabei vorzugsweise hangaufwärts. Dies deckt sich mit Untersuchungen der Moorentwicklung im

[4] Aus Platzgründen wird auf die Wiedergabe der mit den verschiedenen Methoden erzeugten Ausbreitungskarten verzichtet. Sie unterscheiden sich in ihrer generellen Aussage kaum voneinander.

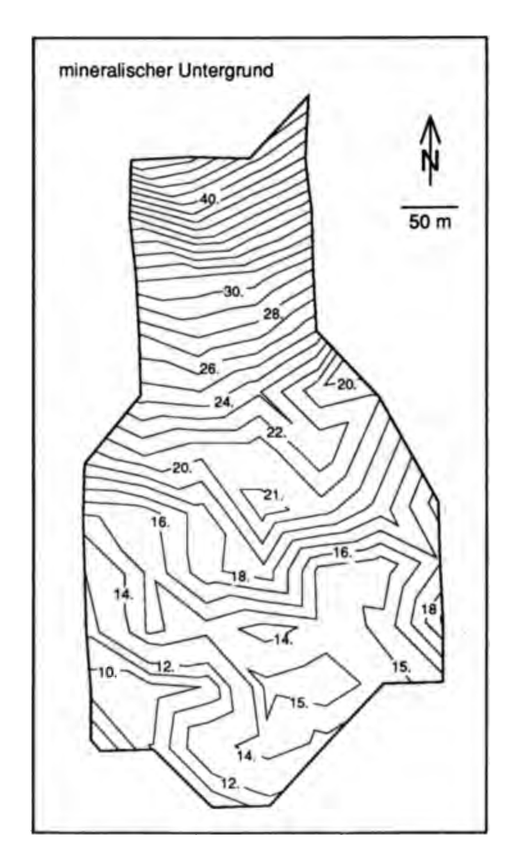


Bild 16 Oberfläche des Mineralbodens (Äquidistanz der Höhenlinien: 1 m).

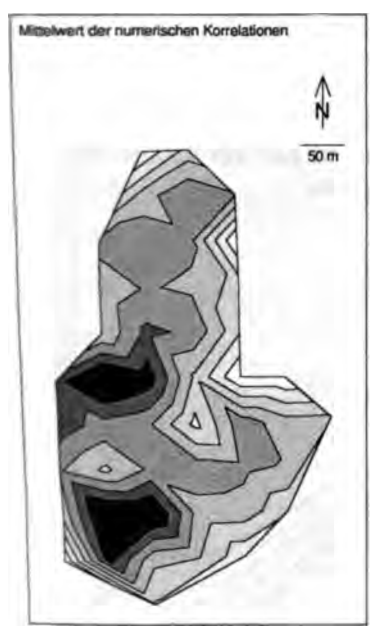
Fig. 16 Surface of the mineral soil. The aequidistance of the contour lines is 1 m.

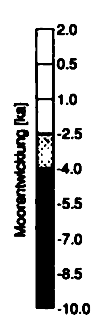
Oberharz (I. Henrion, 1982). Danach breitet sich das Moor nur noch sehr wenig aus. Die Ursache ist geologisch bedingt: Im Westen verhindert ein Bach die weitere Ausbreitung, im Osten Schlucklöcher und im Süden und Norden die steil abfallenden Hänge.

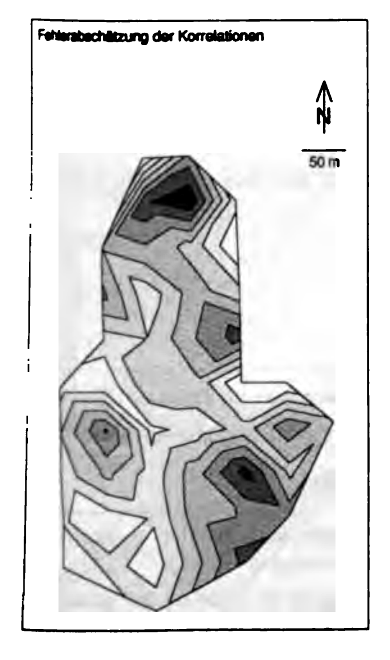
Mit der Datierung der Transsekte ist es möglich, die dreidimensionale Entwicklung des Moores nachzuvollziehen. Von besonderem Interesse ist dabei, wie sich die Mooroberfläche entwickelt hat. Beide Transsekte bestehen lithologisch aus Hoch- und Übergangsmoortorfen. Die dominierende Pflanze in den Torfen ist Eriophorum vaginatum. Sphagnum-Torfe finden sich meist nur in den oberen 1–2 m.

Die Bilder 18 und 19 zeigen die Entwicklung. Die Oberflächen sind mehr oder weniger hangparallel im Transsekt 23–32 bzw. horizonal im Transsekt (4)–11–67. Die zurückgerechnete, hellgrau eingezeichnete, ehemalige Hochmoorfläche deutet jedoch darauf hin, dass die Mooroberfläche leicht gewölbt war.

Hangaufwärts gelegene Gebiete begannen erst Torf zu bilden, nachdem die tiefer gelegenen Gebiete schon «aufgefüllt» waren. Obwohl die Wölbung des







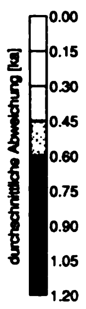


Bild 17 Horizontale Ausbreitung des Hochmoors
a) Ausbreitungskarte der datierten Basisproben
b) Fehlerabschätzung der numerischen Datierung.

Fig. 17 Horizontal spread of the peat bog
a) Map of dated samples at the base of peat formation
b) Estimation of error of the numerical dating method.

Torfkörpers nur sehr schwach ist, puffert der am Oberrand gebildete Torf das kalkreiche Hangwasser so stark ab, dass sich weiter unten eine oligotrophe Hochmoorvegetation bilden konnte.

Das vertikale Wachstum schritt ungehindert bis in die Neuzeit fort. Das Ende der horizontalen Ausbreitung wirkte sich somit nur am Rande des hydrologischen Einzugsgebietes auf die Torfbildung aus.

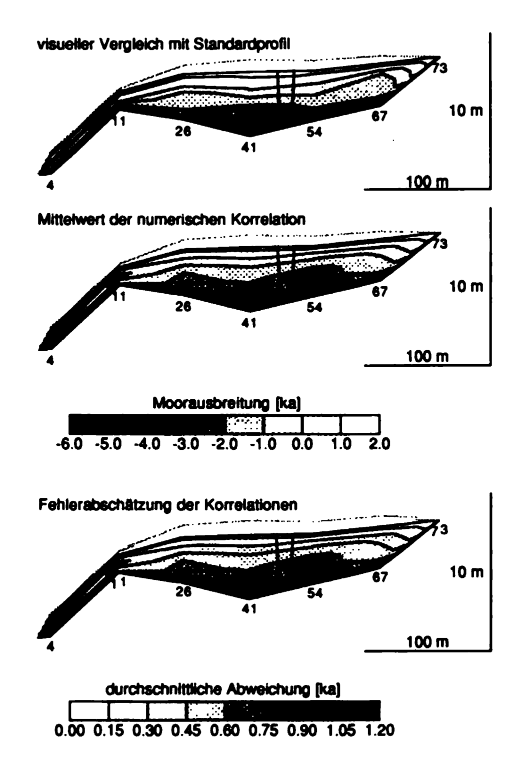


Bild 18 Torfwachstum im Transsekt 4–67.

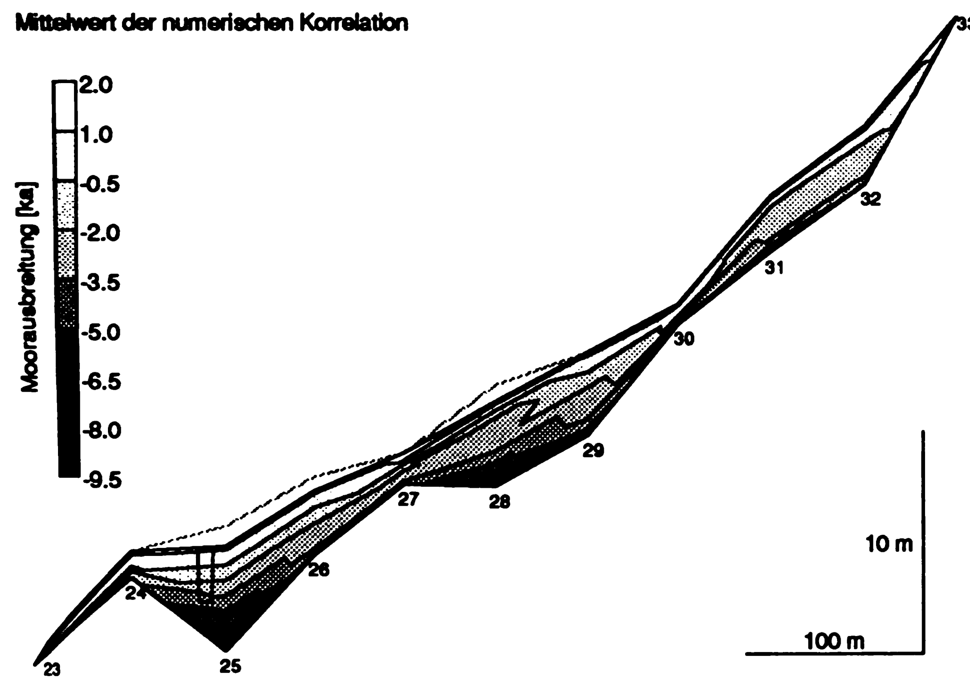
Fig. 18 Map of peat bog growth in transsect 4–67.

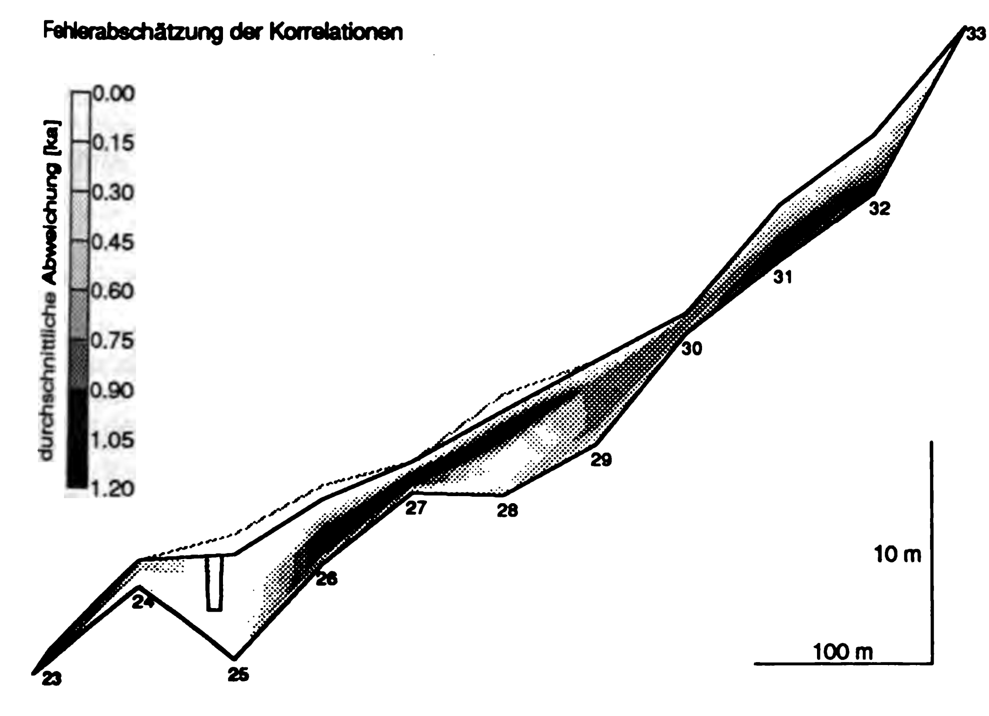
Bild 19 Torfwachstum im Transsekt 23–32.

Fig. 19 Map of peat bog growth in transsect 23–32.

Bild 20 Fehlerabschätzung der numerischen Datierung im Transsekt 23–32.

Fig. 20 Estimation of error of the numerical dating method in transsect 23–32.


Mittelwert der numerischen Korrelation
Mooraausbreitung [ka]
2.0
1.0
-0.5
-2.0
-3.5
-5.0
-6.5
-8.0
-9.5
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
10 m
100 m


Fehlerabschätzung der Korrelationen
durchschnittliche Abweichung [ka]
0.00
0.15
0.30
0.45
0.60
0.75
0.90
1.05
1.20
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
10 m
100 m

6 Schlussfolgerungen

Die numerische Datierung einzelner Pollenproben aufgrund eines Standardprofils und von ^{14}C-Daten erlaubt die Entwicklung eines Moores quantitativ zu bestimmen. Die resultierenden Daten sind genauer als die durch visuellen Vergleich mit den biostratigraphischen Zonen erzielte Datierung. Mit der Anwendung verschiedener Ähnlichkeitsmasse lassen sich Fehlergrenzen abschätzen und unsichere Datierungen überprüfen. Der gewählte vertikale Probenabstand von 5–10 cm im Standardprofil führt zu unabhängigen Proben. Vermutlich liessen sich durch einen engeren Probenabstand die Resultate noch verbessern. Der horizontale Probenabstand von 50 m für die Basisproben gibt die wesentlichen Eigenheiten der Moorentwicklung wieder. Der Abstand liegt etwa im Bereich der Genauigkeit der Datierungsmethode.

Das Moorwachstum scheint gegenüber Umwelteinflüssen recht unempfindlich zu sein. Ein Hinweis darauf ist die sehr gute lineare Beziehung zwischen Torfmächtigkeit und Alter. Das nicht messbar gehemmte vertikale Torfwachstum bestätigt die Hypothese, dass die Durchlässigkeit des Torfkörpers durch interne Prozesse gesteuert wird (M. Schneebeli, 1988).

7 Anhang

A Definition des Semivariogramms

Der räumliche Zusammenhang einer Messgrösse lässt sich mit dem Semivariogramm beschreiben (Dutter, 1985). Das experimentelle Semivariogramm $\gamma(h)$ ist mit den Messwerten x, die voneinander um den Abstand h entfernt sind, definiert als

$$\gamma(h) = \frac{1}{2\,n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \qquad (7.1)$$

Das Semivariogramm wird folgendermassen interpretiert: Im Abstand 0 ist die Variabilität γ Null. Sie steigt mit zunehmendem Abstand. In einem stationären Gebiet erreicht sie einen oberen Wert, der gleich der Varianz ist. Der Bereich des Anstiegs gibt den Einflussbereich an, wo die Werte untereinander korreliert sind.

B Definition der Ähnlichkeitsmasse

Als Ähnlichkeitsmasse wurde der lineare Korrelationskoeffizient (oder Pearson Korrelationskoeffizient) und der Spearman Korrelationskoeffizient verwendet. Der Spearman Korrelationskoeffizient entspricht im wesentlichen dem linearen Korrelationskoeffizienten, benutzt jedoch Rangzahlen.

Der lineare Korrelationskoeffizient r (Wildi, 1986) ist definiert als

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2}} \tag{7.2}$$

Für die Berechnungen wurde der Algorithmus von O. Wildi (1983) verwendet. Der Spearman Korrelationskoeffizient ist gleich wie der lineare Korrelationskoeffizient definiert, die Zahlen x_i und y_i werden jedoch durch die entsprechenden Ränge R und S ersetzt. Treten gleichgrosse Werte x und y auf, werden diese durch den Mittelwert der Ränge ersetzt, welche sie hätten, wenn sie leicht verschieden wären. Der Spearman Korrelationskoeffizient ϱ ist mit N = Anzahl der Rangpaare, R = Ränge der x_i, S = Ränge der y_i definiert als (korrigiert nach D.S. Feldmann und J. Gagnon, 1986)

$$\varrho = \frac{\Sigma x^2 + \Sigma y^2 - \Sigma (R - S)^2}{2\sqrt{(\Sigma x^2)(\Sigma y^2)}} \tag{7.3}$$

mit $\Sigma x^2 = \frac{N^3 - N}{12} \Sigma T_x$; $\Sigma y^2 = \frac{N^3 - N}{12} \Sigma T_y$,

und $T_x = \frac{t^3 - t}{12}$; $T_y = \frac{t^3 - t}{12}$

wobei t die Anzahl der Beobachtungen x bzw. y ist, welche den gleichen Rang aufweisen. Der verwendete Algorithmus wurde mit Korrekturen aus W.H. Press et al. (1986) entnommen.

8 Literatur

Birks, H.J.B. und A.D. Gordon (1985), Numerical Methods in quaternary pollen analysis. Academic Press London a.o., 317 Seiten.

Bonani, G., H.J. Hofmann, E. Morenzini, M. Nessi, M. Suter und W. Wölfli (1986), The ETH/SIN dating facility: a status report. Radiocarbon 28 (2A): 246–255.

Chatfield, C. (1984), The analysis of time series. Chapman and Hall London a.o., 286 Seiten.

Clymo, R.S. (1984), The limits of peat bog growth. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 303: 605–654.

Dutter, R. (1985), Geostatistik. Eine Einführung mit Anwendungen. Teubner Stuttgart, 159 Seiten.

Fäh, J. (1986), Erste Ergebnisse der Untersuchung zur Entwicklung eines Hangmoores im Oberen Toggenburg (Kanton St. Gallen). Telma 16: 23–30.

Feldman, D.S. und J. Gagnon (1986), Stat-View 512+. Manual. Brain Power Calabasas CA, 180 Seiten.

Grünig, A., L. Vetterli und O. Wildi (1986), Die Hoch- und Übergangsmoore der Schweiz. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Bericht 281: 1–62.

Hantke, R. (1967), Die würmeiszeitliche Vergletscherung im Oberen Toggenburg (Kanton St. Gallen). Vierteljahrsschrift Naturforsch. Ges. Zürich 112: 223–242.
Havinga, A.J. (1976), Palynology and pollen preservation. Rev. Palaeobot. Palynol. 2: 81–98.
Henrion, I. (1982), Untersuchungen zur Entwicklung von Sattelmooren im Oberharz. Diss. Univ. Göttingen, 162 Seiten.
Ingram, H.A.P. (1982), Size and shape in raised mire ecosystems: a geophysical model. Nature 297: 300–303.
Küttel, M. (1977), Pollenanalytische und geochronologische Untersuchungen zur Piottino-Schwankung (Jüngere Dryas). Boreas 6: 259–274.
Küttel, M. (1988), Züge der jungpleistozänen Vegetations- und Landschaftsgeschichte der Zentralschweiz. Rèvue de Paléobiol., im Druck.
Küttel, M. und A. Lotter (1987), Vegetation und Landschaft der Zentralschweiz im Jungpleistozän. Mitt. Natf. Ges. Luzern 29: 251–272.
Linder, A. und W. Berchtold (1979), Elementare statistische Methoden. Birkhäuser Basel a.o., 248 Seiten.
Mangerud, J., S.T. Andersen, B.E. Berglund und J.J. Donner (1974), Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. Boreas 3: 109–128.
Markgraf, V. (1980), Pollentransport in einem Berggebiet. Proc. 1st int. Conf. Aerobiology, Munich 1978. Berichte Umweltbundesamt 5/79: 30–49.
Merkt, J. und J. Streif (1970), Stechrohr-Bohrgeräte für limnische und marine Lockersedimente. Geol. Jb. 88: 137–148.
Moore, P.D. (1986), Site History. In: P.D. Moore und S.B. Chapman (ed.), Methods of plant ecology. 2nd ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford a.o., 589 Seiten.
Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling (1986), Numerical Recipes. The art of scientific computing. Cambridge University Press Cambridge a.o., 818 Seiten.
Renner, F. (1982), Gletscher-, Vegetations- und Klimageschichte im Raume Urserental–Furkapass. Phys. Geographie 7: 8–27.
Schneebeli, M. (1988), Bodenphysikalische und pflanzensoziologische Untersuchungen im Hochmoor Turbenriet, Grabs SG, im Hinblick auf seine Regeneration. Berichte der Botanisch-Zoologischen Gesellschaft Liechtenstein-Sargans-Werdenberg, im Druck.
Solem, T. (1986), Age, origin and development of blanket mires in Sør-Trøndelag, Central Norway. Boreas 15 (2): 101–115.
Stockmarr, J. (1971), Tablets with spores used in absolute pollen analysis. Pollen et Spores 13: 615–621.
Taranatola, A. (1987), Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier Amsterdam a.o., 613 Seiten.
Wegmüller, H.P. (1972), Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den Thuralpen und im Faningebiet (Kantone Appenzell, St. Gallen, Graubünden/Schweiz). Bot. Jahrb. Syst. 97: 226–307.
Wildi, O. (1978), Simulating the development of peat bogs. Vegetatio 37 (1): 1–17.
Wildi, O. (1983), Management and Multivariate Analysis of Vegetation Data. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Ber. 215, 2nd ed.: 1–136.
Wildi, O. (1986), Analyse vegetationskundlicher Daten. Veröff. Geobot. Inst. Eidg. Tech. Hochschule. 90: 1–226.

Dr. Meinrad Küttel, Fachhochschule Wiesbaden, Fachbereich Weinbau und Getränketechnologie, von Lade-Strasse 1, D-6222 Geisenheim
Martin Schneebeli, ETH Zürich, Fachbereich Bodenphysik, ETH-Zentrum NO, CH-8092 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/1: 33–54

Kometen, Monde, Neue Sterne: Der Einfluss der Beobachtungen auf die kopernikanische Revolution [1]

Ueli Niederer, Universität Zürich

Nachdem die Beobachtungen für Kopernikus selbst noch eine nebensächliche Rolle gespielt hatten, beeinflussten sie später in bedeutendem Masse die Verbesserung und die Aufnahme des kopernikanischen Systems. Mehrere Wirkungsweisen lassen sich unterscheiden. Die Beobachtungen Tycho Brahes veranlassten Kepler zur Weiterentwicklung des Systems. Die Neuen Sterne von 1572 und 1604 und der Komet von 1577 liessen erkennen, dass am Himmel Veränderungen möglich waren und deshalb die aristotelischen Ansichten über die Natur des Himmels, auf denen die alte Astronomie beruhte, nicht stimmen konnten. Die von Galilei 1610 entdeckten Jupitermonde bewiesen, dass es neben der Erde auch andere Bewegungszentren gab, was wiederum dem heliozentrischen System mehr Glaubwürdigkeit verlieh. Neuere und genauere Beobachtungen machten immer deutlicher, dass die neue Astronomie auch in der Anwendbarkeit der älteren überlegen war.

Comets, Moons, New Stars: The Role of Observation in the Copernican Revolution

While observations played a minor role for Copernicus himself they later influenced considerably the improvement and the reception of the Copernican system. Several types of influence may be distinguished. The observations made by Tycho Brahe were the primary motive for Kepler to modify and develop the system. The newly appeared stars of 1572 and 1604 and the comet of 1577 showed that changes in the heavens were possible, hence the Aristotelian views on the nature of celestial bodies, which formed the basis of traditional astronomy, could no longer be correct. The moons of Jupiter, discovered by Galileo in 1610, demonstrated that there were other centers of motion besides the earth, which in turn made the heliocentric system more credible. Newer and better observations made it ever more obvious that in applicability, too, the new astronomy was superior to the older one.

1 Einleitung

Die Astronomie ist zuerst und vor allem eine beobachtende Wissenschaft. Es erstaunt deshalb, dass die historischen Darstellungen der kopernikanischen Revolution zwar mit Recht die grossen theoretischen Leistungen der Väter der neuen Astronomie hervorheben, die astronomischen Beobachtungen aber meist nur nebenbei oder gar nicht erwähnen. Die vorliegende Arbeit will den zeitgenössischen Beobachtungen und ihrer Rolle beim Übergang zum neuen Weltbild der Astronomie nachspüren und sie an einigen Beispielen illustrieren.

---

[1] Nach einem Vortrag im Wissenschaftshistorischen Kolloquium «Die kopernikanische Revolution in der Astronomie», Universität/ETH Zürich, Sommersemester 1988.

Aufgabe der astronomischen Systeme war nach einem alten Ausdruck das «Heilen der Erscheinungen». Darunter verstand man, die dem Beobachter zunächst regellos erscheinenden Bewegungen der Himmelskörper mittels geometrischer Modellvorstellungen auf die anerkannten grundlegenden Prinzipien der Philosophie zurückzuführen. In dieser Dreiheit von Beobachtungskunst, Mathematik und Philosophie nehmen die Beobachtungen wohl einen wichtigen Platz ein, doch treten sie bei der kopernikanischen Wende zunächst in den Hintergrund gegenüber dem Umsturz in den philosophischen Grundlagen, welcher im Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild lag. Kopernikus erarbeitete sein System noch weitgehend auf der Grundlage überlieferter Beobachtungen, ergänzt zwar um einige eigene, die aber keine wesentlich neuen Erkenntnisse brachten. Das ptolemäische und das kopernikanische System sind beobachtungsmässig gleichwertig; beide gestatten es grundsätzlich, die Örter der meisten Planeten im Rahmen der damaligen Beobachtungsgenauigkeit von etwa 10 Bogenminuten befriedigend wiederzugeben. Wenn somit die zeitgenössischen Beobachtungen auf den ersten Blick eine eher nebensächliche Rolle spielten und jedenfalls nicht der Anlass für die kopernikanische Wende waren, so sollte sich dies später ändern. Für die Verbesserung des Systems durch Kepler und für den Durchbruch des heliozentrischen Weltbildes waren die astronomischen Beobachtungen von ausschlaggebender Bedeutung.

Unsere Aufmerksamkeit gilt hier dem vergleichsweise kurzen Zeitraum eines halben Jahrhunderts von etwa 1570 bis 1620, in dem einige astronomische Beobachtungen stattfanden, welche die Aufnahme des kopernikanischen Systems entscheidend beeinflussen sollten. Um einen besseren Überblick über den Einfluss der Beobachtungen zu gewinnen, unterscheiden wir vier Arten von Wirkungen, die in der folgenden Wirkungstypologie zusammengestellt sind.

Typ 1: Beobachtungen, die eine Verbesserung der Theorie ermöglichten. Hier sind vor allem die Beobachtungen Tycho Brahes zu erwähnen (Kapitel 2), mit denen Kepler seine Gesetze der Planetenbewegungen finden konnte.

Typ 2: Beobachtungen, welche Widersprüche zum aristotelischen Weltbild aufzeigten und damit das heliozentrische System indirekt förderten, indem sie seinem Gegenstandpunkt, dem geozentrischen System, die philosophische Grundlage entzogen. Hierzu gehören in erster Linie die Beobachtungen von neuen Sternen (Kapitel 3) und Kometen (Kapitel 4).

Typ 3: Beobachtungen, die das heliozentrische System glaubwürdiger machten und ihm damit eine Stütze verliehen. Im Vordergrund stehen hier die ersten Fernrohrbeobachtungen Galileis (Kapitel 5).

Typ 4: Beobachtungen, welche die Brauchbarkeit der neuen Astronomie belegten und zeigten, dass sie der älteren überlegen war. Darauf gehen wir kurz in Kapitel 6 ein.

Die vier Wirkungstypen können sich überschneiden, und eine gegebene Beobachtung lässt sich oft nicht eindeutig nur einem einzigen Typ zuordnen. Im

übrigen fehlt im obigen Wirkungsschema ein fünfter Typ, der sich auf Beobachtungen bezieht, welche die Richtigkeit des heliozentrischen Systems nachwiesen. Solche Beobachtungen gab es indessen erst nach der hier behandelten Zeit, als die kopernikanische Revolution längst abgeschlossen war. Der Vollständigkeit halber seien zwei derartige Nachweise kurz erwähnt. Ein astronomischer Nachweis des jährlichen Umlaufs der Erde um die Sonne gelang Bessel, als der 1838 am Stern 61 *Cygni* erstmals eine jährliche Parallaxe mass. Einen physikalischen Nachweis der täglichen Erdrotation erbrachte 1851 Foucault mit einem Pendel von 67 m Länge, dessen Schwingungsebene sich gegenüber dem Erdboden drehte. Diese Beobachtungen, insbesondere die der jährlichen Parallaxe, schlossen offengebliebene Lücken, konnten aber den Verlauf der kopernikanischen Revolution nicht mehr beeinflussen.

2 Die Beobachtungen Tycho Brahes

2.1 Tycho Brahe

Im letzten Viertel des sechzehnten Jahrhunderts nahm die Beobachtungskunst, kurz vor der Erfindung des Fernrohrs, einen ungeahnten Aufschwung. Den Sternenhimmel zu beobachten wurde populär, und selbst gekrönte Häupter gaben sich diesem Zeitvertreib hin, indem sie entweder selbst als Beobachter wirkten oder zumindest einen Hofastronomen beschäftigten. Vermehrt wurden auch astronomische Beobachtungen um ihrer selbst willen durchgeführt, aus Interesse am beobachteten Gegenstand. Gehörte die Astronomie als eine der sieben freien Künste schon immer zum propädeutischen Programm eines Universitätsstudiums und war damit Bestandteil des Wissens eines jeden Gebildeten, so entwickelte sie sich nun mehr und mehr zu einer Fachwissenschaft *sui generis,* die über blosse Grundkenntnisse weit hinausging. Der zu seiner Zeit bedeutendste Exponent dieser fachwissenschaftlichen Haltung war Tycho Brahe, ein durch und durch professioneller Astronom, der ganz der Astronomie lebte.

Tycho Brahe (1546–1601) war ein dänischer Adliger, der zur zentralen Gestalt der zeitgenössischen Astronomie wurde. Von seinem König erhielt er die Insel Hven im Sund zwischen Dänemark und Schweden zu Lehen und erbaute darauf Uraniborg, einen gewaltigen Gebäudekomplex, der vor allem als Observatorium diente und mit den besten Instrumenten ausgerüstet war. Die Zeit auf Hven in den Jahren 1576–1597 ist die Hauptperiode von Tychos astronomischen Beobachtungen. Später zog er an den Hof von Kaiser Rudolph II. in Prag, wo ihm nach dem Tode Kepler als kaiserlicher Mathematiker nachfolgte. Tycho Brahe war mit Abstand der beste und genauste Beobachter, den die Astronomie der Vorfernrohrzeit kannte, und sein nachgelassenes Beobachtungsmaterial übertraf an Umfang und Sorgfalt alles bisher Dagewesene bei weitem.

2.2 Instrumente

Die meisten der hier behandelten astronomischen Beobachtungen fallen in eine Zeit, als die Astronomen noch mit nacktem Auge, ohne die optische Verstärkung des Fernrohrs beobachten mussten. Ihre Instrumente waren im Grunde genommen nichts anderes als gigantische Winkelmesser. Die beiden folgenden Abbildungen sollen einen Eindruck von den damaligen Beobachtungsinstrumenten vermitteln; sie stammen aus einem Werk Tychos (Tycho Brahe 1598), in dem er alle seine Instrumente in Bild und Text vorstellt. Bild 1 zeigt sein bekanntestes Instrument, den grossen Mauerquadranten mit einem Radius von etwa 2 m. Die Mauer mit dem Bildnis Tychos steht exakt im Meridian. Durch den Diopter und die Maueröffnung oben links visiert der Beobachter einen Stern, der gerade durch den Meridian geht, und liest auf der Winkelskala die Meridianhöhe ab. Ein Mitarbeiter bestimmt die Uhrzeit des Meridiandurchgangs, und ein weiterer führt das Beobachtungsjournal. Bild 2 zeigt einen grossen Sextanten von etwa 1,6 m Radius, den Tycho bevorzugt immer dann einsetzte, wenn er den Winkelabstand zweier Sterne messen wollte. Der Sextant lagert auf einer Kugel und ist so in jede gewünschte Messebene drehbar. Von den zwei Beobachtern visierte einer den einen Stern über die obere Kante und fixierte gleichzeitig das Instrument von Hand mit zwei Stöcken; der zweite visierte den anderen Stern über den beweglichen Radius.

Tycho Brahe erreichte mit seinen Instrumenten eine bisher nie gekannte Genauigkeit. Musste man vor ihm mit Beobachtungsfehlern von etwa 10 Bogenminuten rechnen, so gelang es ihm, die Örter von Himmelskörpern routinemässig auf 1–2 Bogenminuten genau zu bestimmen. Diese gesteigerte Beobachtungsgenauigkeit sollte später für Keplers Verbesserung der kopernikanischen Astronomie den Ausschlag geben.

2.3 Beobachtungen

2.3.1 Fixsterne

Die astronomischen Koordinaten wie ekliptikale Länge und Breite oder Rektaszension und Deklination, mit denen der Ort eines Himmelskörpers angegeben wird, haben für den Beobachter die hinderliche Eigenschaft, dass sich das Koordinatensystem gegenüber der fest gedachten Erde bewegt und zudem der Nullpunkt des Systems am Himmel nicht als besonderer Punkt sichtbar ist. Man kann deshalb den Ort eines Himelskörpers nicht direkt messen, sondern nur in bezug auf andere Örter, die man bereits kennt. Als Bezugspunkte bieten sich die Fixsterne an, weil man den Winkelabstand etwa eines Planeten zu benachbarten Sternen überall leicht messen kann. Die Fix-

---

Bild 1 Tycho Brahes berühmter Mauerquadrant (Tycho Brahe 1598) ▶

Fig. 1 Tycho Brahe's famous mural quadrant (Tycho Brahe 1598)

ASTRONOMIÆ INSTAURATÆ MECHANICA

QVADRANS MVRALIS SIVE
TICHONICVS.

sternörter werden so zur wichtigen Basis aller Positionsbeobachtungen, und es erstaunt nicht, dass Tycho Brahe besondere Sorgfalt darauf verwendete, die Örter einiger ausgelesener Fixsterne so genau wie möglich zu bestimmen.

Die Deklination eines Sterns ist einfach zu messen. Kennt man die geographische Breite des Observatoriums, so genügt dazu eine Bestimmung der Meridianhöhe, beispielsweise mit dem Mauerquadranten. Schwieriger zu bestimmen ist die Rektaszension, weil der Frühlingspunkt, von dem aus die Rektaszension gezählt wird, nur ein gedachter, dem Auge unsichtbarer Punkt ist. Man behalf sich früher meistens so, dass man den Stern über den Mond an die Sonne anknüpfte, deren Rektaszension als bekannt vorausgesetzt wurde. Tagsüber bestimmte man die Lage des Mondes zur Sonne und anschliessend nachts die Lage des Sterns zum Mond. Als mittleres Glied dieser Messkette hat indessen der Mond verschiedene Nachteile, weil sein Ort grosse Korrekturen für die Eigenbewegung und vor allem für die Parallaxe erfordert. Tycho Brahe ersetzte ihn deshalb durch die Venus, die gelegentlich ebenfalls tagsüber sichtbar ist.

Zur Bestimmung genauer Fixsternörter ging Tycho schrittweise vor (Tycho Brahe 1602 a). Als seinen Hauptstern, der als Ursprung aller anderen Fixsternörter diente, nahm er α *Arietis,* den hellsten Stern im Sternbild des Widders.

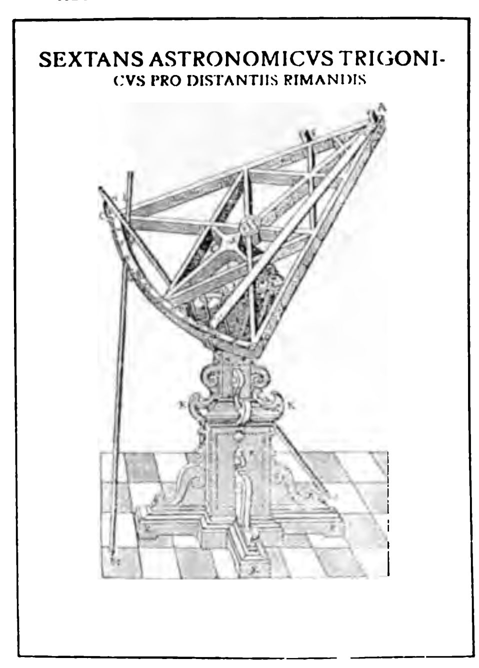


Bild 2 Astronomischer Sextant von Tycho Brahe (Tycho Brahe 1598)

Fig. 2 Astronomical sextant made by Tycho Brahe (Tycho Brahe 1598)

Aus über hundert Beobachtungen wählte er 27 aus, die meisten davon Doppelbeobachtungen in der Form von Morgen/Abend-Paaren, bei denen die Sonne beide Male in gleicher Höhe über dem Horizont stand und die Venus hoch über der Sonne. Dadurch hoben sich einzelne systematische Fehler, verursacht von Refraktion und Parallaxe, in der Mittelung wieder auf. Auf diese Weise gelang es ihm, einen sehr genauen Wert für die Rektaszension zu erhalten, der nach späteren Rechnungen (Dreyer 1890) den schier unglaublich geringen Fehler von ¼ Bogenminuten aufweist. An α *Arietis* anknüpfend bestimmte er jeweils aus mehrfachen Beobachtungen die Position von acht weiteren Fixsternen, so dass er damit eine Sammlung von neun über den Himmel verteilten Fundamentalsternen hatte, deren Örter genau bekannt waren. Diese Liste erweiterte er anschliessend auf 21 Sterne und benutzte sie zur Erstellung eines Sternkatalogs von 777 Fixsternen.

Zwei Früchte der ausgedehnten und sorgfältigen Beobachtung der Fixsterne sind besonders zu erwähnen. Tycho entdeckte und berücksichtigte die als Refraktion bekannte Brechung der Lichtstrahlen in der Atmosphäre, unter deren Einfluss ein gerade auf- oder untergehender Stern um etwa einen Vollmonddurchmesser höher erscheint, als er ist. Weiter bestimmte er die Präzessionskonstante neu zu 51 Bogensekunden pro Jahr, was um weniger als eine Bogensekunde vom genauen Wert abweicht. Diese Neubestimmung der Präzession ist übrigens ein gutes Beispiel für eine Beobachtung vom Wirkungstyp 1, die zur Verbesserung der Theorie beitrug. Wegen der grob falschen Präzessionskonstante von Ptolemäus hatte sich nämlich Kopernikus dazu veranlasst gefühlt, eine zeitlich veränderliche Präzession anzunehmen (die sogenannte Trepidationstheorie), was der Aufnahme seines Systems schadete, weil es dadurch unnötig kompliziert wurde. Tycho Brahes Autorität brachte dann alles Werweissen über eine variable Präzession endgültig zum Erliegen.

2.3.2 Planeten

Während seines etwa zwanzigjährigen Aufenthalts auf Hven widmete sich Tycho Brahe, wann immer es die Umstände und das Wetter erlaubten, der astronomischen Beobachtung, insbesondere der unablässigen Positionsbestimmung der Planeten. Anders als seine Vorgänger beobachtete er die Planeten nicht nur in besonderen Punkten ihrer Bahn oder zu besonderen Zeiten, sondern möglichst regelmässig. Seine Aufzeichnungen gelangten zuerst in die Hände Keplers, der aus ihnen besten Nutzen zu ziehen wusste. Als *Thesaurus Observationum* wurden sie erst in unserem Jahrhundert veröffentlicht und nehmen nun vier Bände der gesammelten Werke ein. Betrachten wir als Beispiel die Beobachtungen des Jahres 1583, die 51 meist zweispaltige Seiten umfassen, nämlich 8 Seiten Beobachtungen der Sonne, 4 des Mondes, 21 der Planeten und 18 der Fixsterne (Tycho Brahe 1923). Mit welch unendlichem Fleiss Tycho die Planeten beobachtete, zeigt ein Blick auf die zwei Spalten vom 19. Januar 1583, wo gegen sechzig Positionsmessungen des Planeten Mars verzeichnet sind, je etwa die Hälfte am frühen Morgen und am Abend. Zwei

Drittel der Beobachtungen sind Messungen des Abstands vom Mars zu nahe gelegenen Fixsternen, die restlichen sind Messungen von Höhe und Azimuth zu verschiedenen Zeiten. Die Abstände zu den Fixsternen wurden meistens mehrmals gemessen, was eine verbesserte Genauigkeit ergab; den Meridiandurchgang beobachtet man an diesem Tag gleichzeitig mit drei verschiedenen Instrumenten. Es versteht sich von selbst, dass Tycho diese vielen Beobachtungen nicht allein durchführen konnte; vielmehr beschäftigte er eine grössere Zahl von Assistenten, und Uraniborg muss wohl eher einem geschäftigen astronomischen Institut als einer privaten Sternwarte geglichen haben.

2.4 Würdigung

Tycho Brahes Schaffen ist so reich, dass seine Beobachtungen nicht einem einzigen der vier Wirkungstypen zugeordnet werden können; in späteren Kapiteln werden wir noch mehrmals darauf zurückkommen. Seine Marsbeobachtungen indessen sind ein klassisches Beispiel – vielleicht sogar das beste und bekannteste Beispiel – für eine Wirkung vom Typ 1, weil sie entscheidend zur Verbesserung der Theorie beitrugen. Kepler entdeckte die Ellipsenbewegung der Planeten (Kepler 1609), als er versuchte, mit den tychonischen Beobachtungen die Elemente der Marsbahn neu zu bestimmen. Sowohl nach dem ptolemäischen als auch nach dem kopernikanischen System, die beide mit Kreisbewegungen arbeiteten, ergaben sich Fehler von bis zu 8 Bogenminuten. Das war, wie Kepler wohl wusste, für die Genauigkeit von Tychos Marsörtern entschieden zu viel. Ausführliche Rechnungen und ausgedehnte Versuche mit neuen Hypothesen, die immer wieder an den tychonischen Beobachtungen geprüft wurden, führten schliesslich Kepler zur Entdeckung der elliptischen Planetenbewegung. Diese Entdeckung, welche erst das kopernikanische System vollendete, wäre nicht möglich gewesen ohne Tychos überreichen Beobachtungsschatz.

Tycho Brahes «Geheimnis» liegt nicht allein in den verbesserten Beobachtungsinstrumenten. Gute Geräte sind zwar eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg, aber sie bilden nur ein Element neben anderen in einem ganzen Beobachtungskonzept. Zu diesem Konzept, das keiner so meisterhaft handhabte wie Tycho, gehörte auch die Berücksichtigung von Instrumentenfehlern, gehörte auch die ständige Wiederholung von Beobachtungen sowohl mit verschiedenen Instrumenten als auch zu verschiedenen Zeiten. Dazu gehörte schliesslich auch eine sorgfältige rechnerische Auswertung, indem man die Messwerte mit den nötigen Korrekturen versah und aus mehreren Werten den besten auslas – heute würde man von statistischer Auswertung sprechen. Weil Tycho Brahe alle diese Aspekte der astronomischen Beobachtungskunst sorgfältig berücksichtigte, gelang es ihm, die Genauigkeit bis an die Grenzen seiner instrumentellen Möglichkeiten zu steigern. Er darf ohne Übertreibung als Begründer der modernen beobachtenden Astronomie bezeichnet werden, selbst wenn er noch ohne Fernrohr auskommen musste.

3 Neue Sterne

3.1 Die Supernovae von 1572 und 1604

In den Jahren 1572 und 1604 leuchteten am Himmel zwei neue Sterne auf, die den Gelehrten mannigfache Rätsel aufgaben. Man nennt sie heute nach ihren prominentesten Beobachtern die tychonische Supernova (1572, Sternbild *Cassiopeia*) und die keplersche Supernova (1604, Sternbild *Ophiuchus*), doch wollen wir hier den damals gebräuchlichen Ausdruck «Neuer Stern» *(Stella Nova)* verwenden. Bild 3 zeigt eine Wiedergabe der Nova 1572 aus dem unten erwähnten Werk von Hagecius; Kassiopeia erscheint in klassischer Darstellung auf einem Thron sitzend mit einem Palmwedel in der Hand. Das Bild ist seitenverkehrt, so wie es auf einem Himmelsglobus erscheint; die Sternnummern entsprechen der Reihenfolge der Sterne in den Katalogen von Ptolemäus und Kopernikus. Im folgenden werden wir uns fast ausschliesslich mit dem Neuen Stern von 1572 beschäftigen, weil die wesentlichen Wirkungen dieser neuartigen Erscheinungen auf das astronomische Weltbild bereits hier deutlich auftreten.

DIALEXIS

IMAGO CASSIOPEÆ.

Bild 3 Sternbild Cassiopeia mit der Nova 1572 (Hagecius 1574)

Fig. 3 Constellation Cassiopeia with the Nova of 1572 (Hagecius 1574)

DIALEXIS
DE NOVAE ET PRI-
VS INCOGNITÆ STELLÆ
INVSITATÆ MAGNITVDINIS
& ſplendidiſſimi luminis apparitione, & de
eiuſdem ſtellæ vero loco conſtituendo.

*Adiuncta eſt ibidem ratio inueſtigandæ parallaxeos
cuiuſcunque Phænomeni, eiúſque à centro terræ di-
ſtantia, Meteorologicam doctrinam mirificè illu-
ſtrans: nunc primum conſcripta & edita,*

PER

Thaddæum Hagecium ab Hayck, Aulæ Cæſareæ Maie-
ſtatis Medicum.

*Acceſſerunt aliorum quoque doctiſſimorum virorum de eadem
ſtella ſcripta & quædam alia, quæ verſa pagella cognoſces.*

FRANCOFVRTI AD MOENVM.

M. D. LXXIIII.

Bild 4 Titelblatt von Hagecius' Werk (1574) über den Neuen Stern 1572

Fig. 4 Title page of Hagecius' work (1574) on the new star of 1572

Die Nova 1572 strahlte etwa so hell wie Venus im grössten Glanz und erregte ein grosses Aufsehen. Der Fachwelt war eine derartige Erscheinung unbekannt, da sich ausser einer flüchtigen Bemerkung in Plinius' Naturgeschichte in der überkommenen Literatur nichts darüber fand. Es erstaunt deshalb nicht, dass mehr Beobachtungen angestellt und mehr Bücher geschrieben wurden als je zuvor bei einer besonderen Himmelserscheinung. Dutzende von Autoren äusserten sich zur Nova, meistens in einer eigens darüber verfassten Abhandlung. Das beste Werk stammt aus der Feder Tycho Brahes (Tycho Brahe 1602b), doch ist über diesen Astronomen hier schon so viel die Rede, dass wir zur Abwechslung einmal einen anderen Gelehrten berücksichtigen wollen.

3.2 Thaddaeus Hagecius

Thaddaeus Hagecius (1525–1600) war kaiserlicher Hofarzt in Prag. Stark an Astronomie interessiert, war er mit Tycho Brahe befreundet und betrieb auch

dessen spätere Berufung an den kaiserlichen Hof. Er beobachtete die Nova von Anfang an intensiv, befasste sich vor allem mit der Entfernungsbestimmung und legte 1574 die Ergebnisse in seinem Buch *Dialexis* nieder (Hagecius 1574); das Titelblatt ist in Bild 4 wiedergegeben. Von einem Mann in der Stellung Hagecius' erwartete man selbstverständlich eine öffentliche Meinungsäusserung zu einer so ungewöhnlichen Erscheinung, und sei es nur zu ihrer Bedeutung. Hagecius tat aber mehr, indem er ein Buch schrieb, das durchaus als wissenschaftliches astronomisches Werk gelten darf.

Die *Dialexis* beginnt mit einer kurzen Beschreibung der Erscheinung und vermerkt die Winkelabstände der Nova zu den Hauptsternen der *Cassiopeia*. Dann erörtert Hagecius die Natur des Neuen Sterns, ergeht sich in Polemik gegen andere Autoren, welche die Nova fälschlicherweise für einen Kometen oder einen alten Stern hielten, und gibt seine Meinung kund, dass die Nova erstens tatsächlich neu sei und sich zweitens jenseits der Mondsphäre befinde. Es folgen die Beweise für die supralunare Entfernung, auf die wir im nächsten Abschnitt eingehen. Das Buch endet mit den obligaten Spekulationen über die astrologische und theologische Bedeutung des Neuen Sterns.

3.3 Parallaxe

Im Mittelpunkt der Auseinandersetzung über die Natur des Neuen Sterns stand die naturphilosophisch entscheidende Frage, ob der Ort des Sterns diesseits oder jenseits des Mondes sei. Hagecius führt zwei astronomische Beweise dafür an, dass die Nova 1572 weiter von uns entfernt ist als der Mond. Zum einen zeigte sie keine Eigenbewegung, verhielt sich also wie ein Fixstern, der nur den täglichen Umlauf der Himmelskugel mitmacht; zum andern war keine Parallaxe messbar.

Unter Parallaxe versteht man die scheinbare Änderung der Visierrichtung zu einem Objekt, wenn der Beobachter seinen Standort wechselt. Im folgenden geht es nur um die sogenannte tägliche Parallaxe, die auftritt wegen der täglichen Umdrehung der Erde – oder, geozentrisch ausgedrückt, des Himmelsgewölbes –, wodurch ein Stern je nach Beobachtungszeit in verschiedener Höhe über dem Horizont sichtbar ist. Ein Blick auf Bild 5 macht dies deutlicher. Die Abbildung entstammt einem damals sehr bekannten und häufig zitierten Werk des Astronomen Johannes Regiomontanus (1436–1476) über die Bestimmung von Kometenörtern (Regiomontanus 1472). H ist der Beobachter, A dessen Zenith, G der betrachtete Himmelskörper; B ist der wahre auf den Erdmittelpunkt E bezogene, C der scheinbare vom Beobachter gesehene Ort des Himmelskörpers. Der Scheitelwinkel bei G ist die Parallaxe, die offensichtlich von der Entfernung EG abhängt und mit zunehmender Zenithdistanz (Winkel AHG) zunimmt. Die Parallaxe ist damit ein Mass für die Entfernung eines Himmelskörpers von der Erde. Die Entfernung lässt sich berechnen, sobald man zwei Zenithdistanzen kennt, wenn möglich einmal in grossem und einmal in kleinem Abstand vom Zenith. Für den Mond, den uns

am nächsten gelegenen Himmelskörper, kann die Parallaxe bis zu 1° ausmachen.

Die Parallaxe der Nova 1572 war besonders einfach zu bestimmen, weil der Stern zirkumpolar war und damit sowohl in der oberen als auch in der unteren Kulmination beobachtet werden konnte. Aus zwei Beobachtungen liess sich die Summe der Parallaxen in den beiden Kulminationen bestimmen. Nach Hagecius war sie praktisch unmessbar klein, während sie für einen Körper in Mondentfernung etwa 1° hätte betragen müssen; somit, so schloss er, befand sich die Nova eindeutig viel weiter von uns weg als der Mond. Zum gleichen Ergebnis gelangte Tycho Brahe (1602b), wenn auch mit weit zahlreicheren und genaueren Beobachtungen. Er ging in seinen Schlüssen sogar noch einen Schritt weiter und argumentierte wie folgt:

Der Neue Stern ist weit jenseits der Mondsphäre; in jener Region befinden sich die Planeten; Planeten haben eine jährliche Bewegung, die Nova hat keine; also ist die Nova ein Fixstern. Kepler konnte diesen Schluss später erhärten (Kepler 1606), als er – auf heliozentrischer Basis – aus der Unmessbarkeit einer jährlichen Parallaxe folgerte, dass die Nova 1604 mehr als sechzigmal so weit von uns entfernt war wie der Planet Saturn. Eine reichhaltige und ausführliche Erörterung vieler Beobachtungen und Schlussfolgerungen über die Entfernung der Nova 1572 findet sich übrigens in Galileis Dialog über die beiden Weltsysteme (Galilei 1632; Dritter Tag).

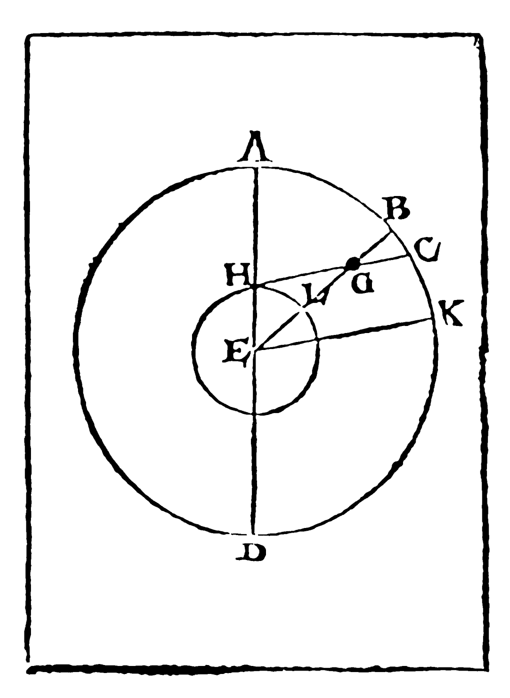


Bild 5 Erklärung der **Parallaxe (Regiomontanus 1472)**

Fig. 5 Explanation of **parallax (Regiomontanus 1472)**

3.4 Wirkung

Alles deutete darauf hin, dass der Neue Stern 1572 weit jenseits des Mondes lag, vielleicht sogar ein Fixstern war. Um zu sehen, warum dieser Sachverhalt die Entwicklung der Astronomie nachhaltig beeinflusste, müssen wir zuerst einen besonderen Aspekt des damaligen Weltbildes betrachten: die dualistische Scheidung der Welt in einen sublunaren und einen supralunaren Bereich. Die weitgehend auf Aristoteles zurückgehende Naturphilosophie, die auch dem geozentrischen System zugrunde lag, sah es als gegeben an, dass die Welt unterhalb des Mondes von grundsätzlich anderer Natur ist als die Welt oberhalb des Mondes. Die gegensätzlichen Eigenschaften der beiden Bereiche sind in folgender Liste zusammengefasst.

Sublunar	Supralunar
- Erde	- Himmelskörper
- geradlinige oder erzwungene Bewegungen	- gleichförmige Kreisbewegungen
- der Korruption und Veränderung unterworfen	- keine Entstehung und keine Veränderungen ausser den Bewegungen
- elementar (besteht aus den vier Elementen)	- ätherisch (besteht aus dem fünften Element, dem Äther)

Die Mondsphäre bildet die Grenze zwischen den beiden Bereichen, da der Mond als Himmelskörper mit wechselnder Gestalt an beiden teilhat.

In diesem geordneten dualistischen Bild war der Neue Stern von 1572 ein Ärgernis, das nicht hineinpassen wollte. Die Nova war ganz offensichtlich neu entstanden. Nach traditioneller Auffassung entstand aber in der supralunaren Welt nichts Neues, also musste die Nova sublunar sein. Umgekehrt zeigten genaue Beobachtungen, dass die Nova jenseits des Mondes war, also gab es in der supralunaren Welt eben doch Veränderungen, entgegen der gängigen Auffassung. Zwischen Beobachtung und aristotelischem Weltbild entstand ein offener Widerspruch, das «Heilen der Phänomene» war schwieriger geworden. Die Beobachtungen des Neuen Sterns von 1572 hatten eine ausgesprochene Wirkung von Typ 2: Sie schürten die Zweifel an der Richtigkeit des älteren astronomischen Systems und ebneten so den philosophischen Boden für die Aufnahme des neuen, heliozentrischen Systems.

4 Der Komet 1577

4.1 Zeitgenössisches Interesse

Nachdem schon die Nova 1572 das aristotelische Weltbild erschüttert hatte, war dies in noch viel grösserem Masse nur wenige Jahre später beim Erschei-

nen des Kometen von 1577 der Fall. Der Komet muss einen prächtigen Anblick geboten haben, vermutlich war er der hellste des Jahrhunderts. Kometen sind zwar nicht gerade selten, und als auffällige Himmelsereignisse gaben sie schon früher immer wieder Anlass zu vereinzelten Schriften. Doch inzwischen hatte die Kunst der astronomischen Beobachtung, geschärft am Neuen Stern von 1572, einen wahren Sprung vorwärts gemacht und war reif für eine neue, schwierigere Bewährungsprobe. Nun ging es nicht mehr wie in früheren Kometenschriften vor allem um eine mehr qualitative Beschreibung des Kometen, sondern um eine möglichst exakte Bestimmung seiner Örter und seiner Bahn. Nochmals nahm die Flut der Veröffentlichungen zu. Die meisten Autoren, die sich zur Nova 1572 geäussert hatten, schrieben auch über den Kometen 1577, und über diesen erschienen noch mehr Bücher als über jene; C.D. Hellman erwähnt in ihrer Monographie über den Kometen 1577 (Hellman 1944) gegen 180 Arbeiten.

Wir beschränken uns im folgenden auf das Werk von Tycho Brahe (1588). Das Buch (Bild 6) erschien 1588 aus Tychos eigener Druckerei auf Uraniborg, wurde aber nur an Fachkollegen verschickt und war nicht käuflich. Der auf die eigenen Beobachtungen bezogene Teil war bereits 1578 fertig geschrieben; später fügte Tycho noch ein Kapitel über sein Weltsystem hinzu (siehe Ab-

TYCHONIS BRAHE DANI

DE

MVNDI AETHEREI

RECENTIORIBVS

PHAENOMENIS

LIBER SECVNDVS

QVI EST DE ILLVSTRI STELLA CAVDATA
ab elapso ferè triente Nouembris Anni 1577, vsq;
in finem Ianuarij sequentis
conspecta.

VRANIBVRGI
CVM PRIVILEGIO.

Bild 6 Titelblatt von Tycho Brahes Werk (1588) über den Kometen 1577

Fig. 6 Title page of Tycho Brahe's work (1588) on the comet of 1577

DE MUNDI ÆTHEREI

Bild 7 Der Komet 1577 im tychonischen System (Tycho Brahe 1588)

Fig. 7 The comet of 1577 in the Tychonian system (Tycho Brahe 1588)

schnitt 4.3) und vor allem eine längere, schliesslich mehr als die Hälfte des Werkes ausmachende Auseinandersetzung mit den Meinungen anderer Autoren. Die Auffassung Tychos über die Natur der Kometen geht bereits aus dem provokativen Titel hervor, der den Schweifstern *(stella caudata)* entgegen der gültigen Lehre als Erscheinung der supralunaren Welt *(mundi aetherei)* bezeichnet.

4.2 Entfernung des Kometen

Tycho Brahe beobachtete den Kometen in 32 Nächten vom 13. November 1577 bis zum 26. Januar 1578. Meistens mass er die Abstände zu zwei oder mehr benachbarten Fixsternen, wobei er die Positionen der dazu verwendeten Fixsterne verifizierte, das heisst mit besonderer Sorgfalt neu bestimmte. Aus diesen Messungen berechnete er die Kometenpositionen und erstellte eine Tabelle der täglichen Örter und Eigenbewegungen. Während seiner Sichtbarkeit legte der Komet einen Bogen von nahezu 90° zurück, und seine tägliche Eigenbewegung nahm von 4° auf ¼° ab.

Die Parallaxe des Kometen war schwieriger zu messen als die der Nova 1572, weil der Komet nicht zirkumpolar war und auch nie sichtbar durch den Meridian ging, wo seine Position einfacher zu messen gewesen wäre. Insbesondere aber hatte er eine Eigenbewegung, die sich einer Änderung der Visierrichtung, wie sie eine allfällige Parallaxe verursachen konnte, überlagerte.

Tycho bestimmte die Parallaxe nach folgender Methode. Er nahm zwei Beobachtungen im Abstand von drei Stunden, für welche Zeit er die Eigenbewegung mit genügender Genauigkeit aus seiner Tabelle interpolieren konnte. Der zweite Ort war in geringerer Höhe über dem Horizont, so dass sich dort eine Parallaxe stärker auswirken musste. Nun berechnete er aus dem ersten Ort den zweiten unter der Annahme, dass sich der Komet in Mondentfernung befinde, und verglich ihn mit dem beobachteten Ort. Das ergab ihm einen Fehler von 12 Bogenminuten, während die Annahme, der Komet habe keine Parallaxe, Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem beobachteten zweiten Ort brachte. Aus insgesamt sechs solcher Doppelbeobachtungen erhielt Tycho immer dasselbe Ergebnis: Die Parallaxe des Kometen ist Null oder höchstens 1–2 Bogenminuten. Daraus schloss er, dass der Komet der ätherischen Region angehört, mithin supralunar ist.

4.3 Das tychonische System

Als supralunarer Himmelskörper konnte der Komet entweder einem Fixstern oder einem Planeten verglichen werden. Die Eigenbewegung sprach eher dafür, ihn einem Planeten gleichzusetzen, was Tycho denn auch tat, indem er ihm eine planetenähnliche Bahn zuwies (Bild 7).

Im achten Kapitel des Kometenbuches, der einzigen Stelle in allen seinen Werken, kommt Tycho kurz auf sein eigenes Weltsystem zu sprechen. Das kopernikanische System, sagt er, sei zwar mathematisch in Ordnung, verstosse aber wegen der bewegten Erde gegen physikalische Prinzipien und gegen die heilige Schrift. Sein Ziel sei ein System, das sich sowohl mathematisch als auch physikalisch richtig verhalte, sich den theologischen Zensuren nicht zu entziehen brauche, und zugleich den Himmelserscheinungen Genüge tue. Im tychonischen System – ein Teil davon ist in Bild 7 ersichtlich – ruht die Erde im Mittelpunkt der Welt, um den sich Mond, Sonne und Fixsterne bewegen; das ist sozusagen die ptolemäische Komponente. Die Planeten hingegen, und das ist die kopernikanische Komponente, kreisen alle um die Sonne und bewegen sich gleichzeitig mit ihr um die Erde. Das tychonische System wurde in der Folgezeit oft diskutiert und dem kopernikanischen als die gewissermassen theologisch unverfänglichere Variante gegenübergestellt; aber keiner der bedeutenden Astronomen hat es je übernommen, und das System fiel bald einmal der Vergessenheit anheim.

Von besonderer Bedeutung für die Geschichte der Astronomie ist hingegen, dass Tycho die Kometen als planetenähnliche Körper behandelte. Damit erhöhte sich erstmals die Zahl der Mitglieder unseres Sonnensystems.

4.4 Einfluss

Die Beobachtungen des Kometen 1577 hatten mannigfache Auswirkungen.

Da sich der Komet als supralunar erwiesen hatte, war erneut eine Erscheinung bekannt, die auf eine Veränderlichkeit jenes Teils der Welt hindeutete, der sich nach gängiger Auffassung eigentlich nicht verändern durfte. Die Schwierigkeiten, vor denen sich die traditionelle Philosophie befand, waren diesmal noch grösser als bei der Nova 1572. Die Nova war bloss eine bis anhin unbekannte Erscheinung, deren naturphilosophische Einordnung Schwierigkeiten bot. Kometen hingegen waren seit alters bekannt, und es gab sozusagen eine offizielle Theorie über ihre Natur, die auf Aristoteles zurückging. Lassen wir dazu Tycho Brahe (1578) sprechen:

«Aristotteles ... war der mainung, das in dem himel kain alteration oder ainiche verenderung geschechen unnd auch nichts neues aldar könndte geporen werden, darumb hatt er seine oppinion von den Cometten also herfürbracht, das si nicht im himmel sonndern im obern theil des lufts, bei dem Ellement fheur unnder dem himmel des Monss geporen werden, unnd das si von ainer drocknen unnd faisten matteri kommen, welche auss der erden durch krafft dess gestirn wirt aufgezogen und daroben angezündt, die also brinnet, bis das si sich selbst verzert.»

Während also Aristoteles die Kometen der irdischen, sublunaren Welt zuordnete, zeigten Tychos Beobachtungen, dass der Komet 1577 weit jenseits des Mondes in der Welt der Himmelskörper stand. Kometen waren damit zu Objekten astronomischer Forschung geworden. Die Beobachtungen des Kometen 1577 verstärkten darum nicht bloss, wie schon die der Nova, die Zweifel an der dualistischen Grundlage des alten Weltbilds, sondern widerlegten darüber hinaus eine allgemein anerkannte Theorie des Meisters Aristoteles. Die neue Auffassung über Kometen war für Tychos Zeitgenossen nicht einfach zu akzeptieren. Selbst Hagecius, der kurz vorher noch vehement für die supralunare Natur des Neuen Sterns 1572 eingetreten war, hielt zuerst noch daran fest, dass Kometen atmosphärische Erscheinungen seien. Aber Tychos Autorität war so gross, dass man nicht ernstlich an seinen neuen Erkenntnissen zweifeln konnte, und unter den Fachkollegen nahm die Zahl der «Aristoteliker» rasch ab.

Wenn die Kometen supralunare Erscheinungen waren, dann stand einmal mehr fest, dass am Himmel Veränderungen stattfinden konnten. Vielleicht, so begann man sich zu fragen, sind die Unterschiede zwischen sub- und supralunarer Welt gar nicht so gross, gar nicht so grundsätzlich. Vielleicht unterstehen die Veränderungen am Himmel und auf der Erde sogar denselben Gesetzen. Kepler nahm diesen Gedanken auf, als er versuchte, die Planetenbewegungen mit Kräften zu erklären, die dem Magnetismus ähnlich waren. Den glanzvollen Höhepunkt erreichte die Vereinigung von irdischer und himmlischer Physik in Newtons Idee der allgemeinen Gravitation, wo dieselbe Kraft den Stein zur Erde fallen lässt, den Mond um die Erde und die Planeten um die Sonne treibt. Auf dem Weg zur allmählichen Überwindung des dualistischen Weltbildes waren die Erkenntnisse, welche die Beobachtungen des Kometen 1577 brachten, ein wichtiger Meilenstein.

Die Kometenbeobachtungen hatten eine weitere Wirkung, die der neuen Astronomie den Weg ebnete. Nach alter Vorstellung waren die Planeten nicht einfach Körper, die sich im Vakuum bewegten; vielmehr waren sie je an ihren sich bewegenden Sphären angehaftet, die man sich als körperliche Kugelschalen dachte. Die Sphären füllten den Raum aus, und zwischen ihnen gab es keinen Platz für Kometen. Die Beobachtungen des Kometen 1577 zeigten stattdessen, dass zwischen dem Mond und den Fixsternen durchaus noch Platz für weitere Himmelskörper war. In der Folge verschwand die Vorstellung körperlicher Planetensphären allmählich aus der astronomischen Literatur.

5 Galileis Fernrohrbeobachtungen

5.1 Fernrohr

Galileo Galilei (1564–1642), der als einer der Hauptbegründer der neuzeitlichen Physik zu betrachten ist, lieferte auch zwei für die wissenschaftliche Rezeption des kopernikanischen Systems wichtige Beiträge. In seinem wohl bekanntesten Werk, dem Dialog über die beiden Weltsysteme (Galilei 1632), setzte er sich machtvoll für das heliozentrische System ein, indem er die dagegen aufgeführten physikalischen Argumente zerpflückte und widerlegte. Weniger bekannt, aber für unser Thema wichtiger, sind seine astronomischen Beobachtungen mit dem eben erst erfundenen Fernrohr (Niederer 1982). Wie jedesmal, wenn sich der Astronomie durch technische Erfindungen neue Dimensionen öffneten – man denke nur an die Radioastronomie unseres Jahrhunderts –, nahm das astronomische Wissen sprunghaft zu; nie war dies in so hohem Mass der Fall, wie nach der Erfindung des Fernrohrs, dieses astronomischen Instruments *par excellence.* Die Entwicklung ging sehr schnell voran. Galilei bekam Nachricht von der Erfindung eines Fernrohrs, baute sich selber ein solches Instrument und richtete es als einer der ersten auf den Himmel. Weniger als ein Jahr später veröffentlichte er bereits seine ersten Beobachtungen im *Sidereus Nuncius* (Galilei 1610); weitere sollten folgen.

Galilei wollte seine Beobachtungen vor allem zur Unterstützung des kopernikanischen Weltbildes nutzen, schoss dabei aber gelegentlich über das Ziel hinaus und überschätzte die Beweiskraft der Fernrohrergebnisse. Wenn auch keine seiner Beobachtungen als eigentliche *observatio crucis* gelten kann, so öffneten sie doch der astronomischen Forschung einen neuen Bereich und brachten Ergebnisse, welche die Zweifel am älteren Weltbild weiter nährten und der neuen Astronomie einen höheren Grad an Wahrscheinlichkeit verliehen. Wir greifen im folgenden drei seiner Beobachtungen heraus und diskutieren deren Einfluss auf die Rezeption des heliozentrischen Systems.

5.2 Mond

Als Galilei das Fernrohr auf den Mond richtete, erblickte er eine unebene,

rauhe Oberfläche mit Senkungen und Erhebungen; indem er den Winkelabstand zwischen einer sonnenbeschienenen Bergspitze und dem Schattenrand ausmass, konnte er sogar die Höhe eines Mondberges bestimmen. Der Mond war also keineswegs ein vollkommen sphärischer Körper mit glatter Oberfläche, wie dies die traditionelle Philosophie verlangte. Ein weiteres Mal war damit die Stellung des alten Weltbildes angesichts neuer Erfahrungen geschwächt.

5.3 Jupitermonde

Die für das kopernikanische System wichtigste astronomische Entdeckung Galileis ist die Entdeckung der vier grossen Jupitermonde (1610), die man heute zu Ehren des Entdeckers die Galileischen Monde nennt. Diese Beobachtungen waren aus zwei Gründen, wenn schon kein Beweis, so doch eine wesentliche Stütze des heliozentrischen Systems. Erstens bildete der Jupiter mit seinen Satelliten ein Miniaturmodell des kopernikanischen Sonnensystems. Zum ersten Mal waren jetzt Himmelskörper bekannt, die ein anderes Zentrum als die Erde umkreisten; die Erde war unzweifelhaft nicht länger mehr der Mittelpunkt sämtlicher Himmelsbewegungen. Der zweite Grund hängt mit dem gegen das kopernikanische System erhobenen Vorwurf zusammen, es sei nicht einzusehen, warum die Erde, wenn sie doch nur ein Planet unter anderen sei, als einzige einen Mond haben sollte. Diese Einzigartigkeit galt nun nicht mehr: Auch der Planet Jupiter hatte Monde. Insgesamt hatte die Entdeckung der Jupitermonde durch Galilei eine Wirkung, die wir in der Einleitung als Wirkung vom Typ 3 bezeichnet haben: Das kopernikanische System fügte sich gut in den Rahmen eines erweiterten astronomischen Erfahrungsbereichs ein und wurde glaubwürdiger.

5.4 Venusphasen

Etwa im Oktober 1610 entdeckte Galilei, dass die Venus je nach Stellung zur Sonne dem Betrachter ähnliche Phasen zeigte wie der Mond. Er schloss daraus, dass erstens die Venus ihr Licht von der Sonne hatte und dass sie zweitens der Erde bald näher, bald entfernter als die Sonne sein musste. Somit kreiste die Venus um die Sonne, und das betrachtete Galilei als schlagenden Beweis für das heliozentrische System.

Wir erwähnen die Venusphasen hier bloss, weil sie ein typisches Beispiel dafür sind, wie Galilei manchmal die Beweiskraft seiner Beobachtungen überschätzte. Da der Irrtum, die Existenz der Venusphasen als Beweis für das kopernikanische System anzusehen, auch heute noch gelegentlich wiederholt wird, wollen wir kurz darauf eingehen. Zunächst einmal sind die Phasen im tychonischen System (Bild 7) genau so gut erklärbar, weil auch dort die Venus um die Sonne läuft. Überdies besteht, was die gegenseitige Lage von Venus und Sonne betrifft, zwischen dem tychonischen und dem ptolemäischen Sy-

stem gar kein prinzipieller Unterschied. Bei Ptolemäus bewegt sich die Venus auf einem Epizykel, dessen Mittelpunkt so auf dem Deferenten umläuft, dass er ständig auf der Verbindungsgeraden Erde–Sonne liegt. Die Grösse der Deferenten von Venus und Sonne spielt im System keine Rolle, nur ihr Verhältnis zur Grösse der Epizykel ist wichtig. Man könnte also, ohne an der Brauchbarkeit und der numerischen Vorhersagekraft des ptolemäischen Systems auch nur das Geringste zu ändern, die Deferentenradien von Venus und Sonne gleichsetzen; dann wird die Sonne zum Mittelpunkt des Venusepizykels und das ptolemäische System zum tychonischen. Folglich sind die Venusphasen in allen drei Systemen zwanglos erklärbar. Immerhin mag ihre Entdeckung dazu beigetragen haben, Galilei selbst von der Richtigkeit des heliozentrischen Systems zu überzeugen.

6 Ausblick

6.1 Überlegenheit der neuen Astronomie

Die Entwicklung der neuzeitlichen Wissenschaft lehrt, dass das Schicksal einer Theorie nicht nur von ihrer Widerspruchsfreiheit innerhalb der traditionellen Naturphilosophie abhängt, sondern mehr und mehr auch von ihrer Brauchbarkeit in den wissenschaftlichen Anwendungen. Die professionellen Astronomen wollten primär eine Theorie, die ihnen brauchbare Ergebnisse lieferte, eine Theorie also, mit der sie die Örter von Himmelskörpern bis auf die Beobachtungsgenauigkeit berechnen konnten. Erwies sich hierin eine neue Theorie einer älteren als überlegen, so benutzte man sie ungeachtet allfälliger Widersprüche zu philosophischen Prinzipien; man verwendete sie zumindest zum Rechnen und gewöhnte sich dadurch so an sie, dass sie allmählich zum vertrauten Hilfsmittel wurde, das man nicht mehr missen mochte.

Die durch das Fernrohr erweiterten Möglichkeiten der astronomischen Beobachtung verbesserten die Genauigkeit und forderten entsprechend auch eine zunehmend genauere Theorie. In diesem Sinne ist jede genau beobachtete Planetenposition, die von der neuen Astronomie in der Ausgestaltung Keplers erklärt wurde (Kepler 1627), eine Bestätigung des kopernikanischen Systems. Jede solche Beobachtung war fähig, eine Wirkung vom Typ 4 auszuüben, indem sie dem rechnenden Astronomen vor Augen führte, dass die neue Astronomie der älteren überlegen war. Damit wuchs unter den Fachleuten allmählich auch die Überzeugung, dass das heliozentrische System das richtige sei.

6.2 Wiederkehr des Kometen Halley

Wir schliessen mit einer besonderen Beobachtung von Typ 4, die aber in einer viel späteren Zeit lag und weniger das kopernikanische System selbst als vielmehr dessen theoretische Untermauerung bestätigte. Newtons Himmelsme-

chanik (Newton 1687) stellte das heliozentrische System auf eine neue Grundlage, weil es jetzt möglich wurde, die von Kepler entdeckten Gesetze der Planetenbewegungen aus dem physikalischen Gesetz der Schwerkraft herzuleiten. An die Stelle der alten philosophischen Grundsätze, welche die Astronomen in ihren Systemen zu beachten hatten, trat nun eine auf physikalischen Gesetzen beruhende Weltverfassung (*constitutio systematis mundani* in den Worten Newtons), aus welcher sich die Erscheinungen ableiten liessen. Der empirischen Unterstützung von Newtons Theorie ist unsere letzte Beobachtung gewidmet.

Im Jahre 1705 veröffentlichte Edmond Halley eine Arbeit (Halley 1705), in der er die Bahnen von 24 Kometen auf der Grundlage der newtonschen Himmelsmechanik berechnete. Aus der Ähnlichkeit der Bahnelemente von dreien dieser Kometen aus den Jahren 1531, 1607 und 1682 schloss er, dass es sich um ein und denselben Kometen handeln müsse, der periodisch wiederkehre. Die Wiederkehr dieses Kometen, der heute den Namen Halley trägt, sagte er für die Jahre 1758/59 voraus. Tatsächlich wurde der Komet, mit grosser Spannung erwartet, vom Dezember 1758 bis in den Mai 1759 gesehen (Tammann-Véron 1985).

Die Wiederkehr des Halleyschen Kometen bedeutete den endgültigen Triumph der newtonschen Himmelsmechanik, weil sie zeigte, dass nicht nur Planeten und Monde, sondern auch so ungewöhnliche Erscheinungen wie Kometen den Gesetzen der neuen Physik gehorchten und berechenbar waren. Nachdem schon Tycho Brahe die Kometen aus der Erdatmosphäre in den Himmel versetzt hatte, wurden diese astronomischen Irrläufer nun endgültig als natürliche Mitglieder des Sonnensystems anerkannt. Für Newtons Theorie, welche als eine Art Abschluss der kopernikanischen Wende gelten darf, war die Beobachtung des wiederkehrenden Kometen sozusagen eine *observatio crucis.* Allerdings war damals die einst brennende Frage des geo- oder heliozentrischen Weltsystems schon längst kein Thema mehr.

7 Zusammenfassung

Der Einfluss der astronomischen Beobachtungen auf die kopernikanische Revolution lässt sich in fünf kurzen Thesen zusammenfassen.

1. Beobachtungen spielten bei der Geburt des kopernikanischen Systems keine wichtige Rolle.
2. Die Beobachtungen Tycho Brahes waren der primäre Anlass und der Prüfstein für die Verbesserungen des Systems durch Kepler.
3. Neue Beobachtungen (Novae 1572 und 1604, Komet 1577) schwächten das alte aristotelische Weltverständnis, weil es die neuartigen Erscheinungen nicht mehr zu «heilen» vermochte.
4. Die Fernrohrbeobachtungen Galileis machten das heliozentrische System glaubwürdiger.

5. Genauere Beobachtungen zeigten, dass das kopernikanische System brauchbarer und der alten Astronomie überlegen war.

Wir möchten da noch zweifeln, dass die Beobachtungen, welche auf den ersten Blick so unscheinbar neben den grossen theoretischen Leistungen der neuen Astronomie stehen, in Wirklichkeit einen bedeutenden Einfluss auf den Verlauf der kopernikanischen Revolution hatten!

8 Literatur

Brahe, Tycho (1578), De Cometa Anni 1577. In Band IV.2 der Tychonis Brahe Dani Opera Omnia, edidit I.L.E. Dreyer, Havniae.

Brahe, Tycho (1588), De Mundi aetherei recentioribus Phaenomenis. Band IV.1 der Opera Omnia.

Brahe, Tycho (1598), Astronomiae Instauratae Mechanica. In Band V.1 der Opera Omnia.

Brahe, Tycho (1602a), Astronomiae Instauratae Progymnasmatum Pars Prima. In Band II der Opera Omnia.

Brahe, Tycho (1602b), Astronomiae Instauratae Progymnasmatum Pars Secunda (De Nova Stella). In Band II der Opera Omnia.

Brahe, Tycho (1923), Thesaurus Observationum, tomus I. Band X der Opera Omnia, Havniae 1923.

Dreyer, J. L. E. (1890), Tycho Brahe. Deutsche Übersetzung Karlsruhe 1894, Nachdruck Wiesbaden 1972.

Galilei, Galileo (1610), Sidereus Nuncius. In Band III.1 von Le Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale (A. Favaro), 20 vol., Firenze.

Galilei, Galileo (1632), Dialogo. Band VII der Edizione Nazionale. Deutsche Übersetzung: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, Leipzig 1891; erweiterte Neuausgabe Darmstadt 1982.

Hagecius, Th. (1574), Dialexis de Novae et prius incognitae Stellae ... Apparitione, Francofurti. Faksimileausgabe Prag 1967.

Halley, E. (1705), Astronomiae Cometicae Synopsis, Philosophical Transactions, Nr. 297, March 1705.

Hellman, C. D. (1944), The Comet of 1577: Its place in the history of astronomy. New York; reprinted 1971.

Kepler, J. (1606), De Stella Nova. In Band I der Gesammelten Werke, hrsg. von M. Caspar, München.

Kepler, J. (1609), Astronomia Nova. Band III der Ges. Werke.

Kepler, J. (1627), Tabulae Rudolphinae. Band X der Ges. Werke.

Newton, I. (1687), Philosophiae naturalis Principia mathematica. The third edition (1726) with variant readings, ed. A. Koyré and I.B. Cohen, Harvard University Press 1972.

Niederer, U. (1982), Galileo Galilei und die Entwicklung der Physik, Viertelj.schr. Natf. Ges. Zürich, *127*/3: 205–299.

Regiomontanus, J. (1472), De Cometae magnitudine longitudineque ac de loco eius vero Problemata XVI. Geschrieben 1472, von J. Schoner 1531 und 1544 herausgegeben; Faksimile der Ausgabe 1544 in den Joannis Regiomontani Opera Collectanea, ed. F. Schmeidler, Osnabrück 1972.

Tammann, G.A. und Véron, Ph. (1985), Halleys Komet. Birkhäuser Verlag, Basel/Boston/Stuttgart.

PD Dr. Ueli Niederer, Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich, CH-8001 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/1: 55–66

Heilkunde und Menschenbild[1]

Christian Scharfetter, Universität Zürich

Wissenschaft und mit ihr auch die Medizin als kulturelles Subsystem sind zeit- und kulturabhängige cognitive Strukturierungen. Die Heilkunde ist in ihrem Verständnis vom Menschen, von Wissenschaft, von Krankheit und Heilen kulturabhängig. Eine ganzheitliche Medizin sollte im Ideal somatisch-physiologische, psychologische, soziale und transpersonale Perspektiven auf den Menschen in Gesundheit und Krankheit einbeziehen. Auf nur einen Bereich fixierte Perspektiven sind gefährdet für ideologische Einschränkungen.
Der «Normalität des Leidens» im menschlichen Leben entspricht ein vielschichtiges Heilangebot. Die kritische Sozialgeschichte der Medizin als Beruf zeigt die Selbstmonopolisierung der akademischen Medizin als Profession, die Alleinanspruch auf Heilungsberechtigung erhebt und andere Heilsangebote verdrängt. Die Common-factor-Forschung sucht nach gemeinsamen Wirkbereichen in der Heilungsinteraktion verschiedener Heilsysteme.

Medicine and Anthropology

Science (and therefore medicine too) is a culturally determined system of cognitive structuring. A holistic approach to medicine should take into consideration somatic-physiological, psychological, social as well as transpersonal perspectives towards illness and healing. The ubiquitous suffering creates a multitude of healing offers. Western academic medicine has developed as a profession with claim for monopoly as the only valid healing system, based on empirical positivism of natural science. Common factors appear to be operative in various healing procedures.

1 Einleitung

Das Leben ist kurz / Die Kunst ist gross / Die Erfahrung trügerisch / Die Beurteilung schwierig / Der günstige Zeitpunkt kurz.
Hippokrates

Die heutige westliche Medizin (und mit ihr auch die Psychiatrie) ist von einem Berufsstand mit einem zeitgeschichtlich bestimmten Menschenbild und Wissenschaftsverständnis getragen. Sie gibt sich eine Selbstdefinition als allein kompetenter Heilexperte für menschliches Leiden. Sie erzieht Schüler ähnlich festgelegter und eingeengter Perspektive auf die eigene Profession und die Heilungsuchenden als Träger des Abstraktums Krankheit.

Die Profession selbst, hervorgebracht in einer kulturellen Entwicklung, legt fest, was vom allgegenwärtigen Leid des Menschen ihr Kompetenzgebiet des Behandelns sei, welches das «richtige» Wissen sei und wie man methodisch zu dem komme. Vom Spannungsfeld der Heilkunde zwischen Kunst, Technik und Gewerbe liess der Zeitgeist das technisch-physikalistische Machen (und ökonomischen Gewinn) in den Vordergrund treten. Psychosoziale Gesichtspunkte treten allenfalls sekundär als Appendices somatologischer «Grundla-

[1] Nach einem Vortrag vor der Ärztegesellschaft Zürich am 26.5.1988; ergänzte Fassung der gleichnamigen Arbeit, welche in der Festschrift für den Psychiater Jan Gross im Springer Verlag Heidelberg 1988 erscheinen wird.

gen» hinzu. Relativierung der Profession hinsichtlich der Kulturabhängigkeit ihrer Grundlagen, Wissenschaftlichkeit, Menschenbild, Verständnis von Krankheit und Heilung kommt eher von anderen Fachgebieten (z. B. Soziologie, Ethnologie) als von den Medizinern selbst.

2 Wissen und Wissenschaft

Das Bewusstsein, inkarniert im Einzelwesen, geprägt in der kulturellen Entwicklung, schafft sich person-, zeit-, kulturabhängige Bilder von Selbst und Welt. Der Mensch erfasst «wissenschaftlich» nicht das Ganze von sich und seiner Welt: Das buddhistische Gleichnis von den Blinden, welche von dem Ganzen eines Elefanten jeweils nur Teile kognitiv festlegen («ich stelle fest: ein Speer ... ein Baum ... ein Seil ... eine Wand usw.»), stellt diese alte Einsicht dar.

Der Mensch nimmt nicht eine ideal angezielte «objektive» Wirklichkeit wahr, unabhängig von seinem kognitiven Zugriff, sondern er bildet sich in seinem Bewusstsein seine Welt. In diesem Sinne ist der Mensch Kosmopoet. Das Bewusstsein (griechisch Syneidesis) erschafft sich seine jeweilige Welt in einem Zusammenschauen und Bedeutunggeben in der trinitarischen Union von Erkennendem, Erkanntem und Akt des Erkennens. Erklärungsmodelle für diese selbstgeschaffene Welt sind zeitgeschichtlich-kulturell bedingte Anschauungsformen vom Charakter der Mythen. Der Mensch ist – auch im Wissenschaftszeitalter – Mythopoet. Rilke wusste, dass «die Welt» eine «gedeutete» ist: «Und die findigen Tiere merken es schon, dass wir nicht sehr verlässlich zuhaus sind in der gedeuteten Welt.» «Die Medizin» als kulturelles System konstruiert aus der Fülle des Lebensleides Krankheiten, die substantiviert, objektiviert, abstrahiert zum Gegenstand technisch bewirkten Beseitigens werden: Der Mediziner als Nosopoet. «Beobachtungen» stehen in einer bestimmten kulturell und situativ abhängigen Perspektive, welche ihre Deutung mitbestimmen. Deshalb formulierte Popper (1963): «Clinical observations like all other observations are interpretations in the light of theories.» Und Albert Einstein (1934): «To the discoverer ... the constructions of his imagination appear so necessary and so natural that he is apt to treat them not as the creations of his own thought but as given realities.» Goethe sagte: «Das Höchste wäre zu begreifen, dass alles Faktische schon Theorie ist.» Wissen ist nicht Wissen einer absoluten objektiven Wirklichkeit – das «Faktische» ist ein Gemachtes (Poesis), und zwar vom Beobachter, seiner Person und Kultur und Situation mit-«gemacht» (N. Goodman 1978).

Wissen ist eine Anschauungsform, ein Bewusstseinsgebilde ohne letzten Wahrheits- und Alleingültigkeitsanspruch. Es ist eine – zeitgeschichtlich sich wandelnde – kognitive Strukturierung, Gestaltung, ein Instrument zum Zwecke des handelnden Umgangs (Praxis) mit der selbstkonstituierten Welt (A. I. Hallowell 1955, A. R. Lurija 1986). Wissen hat sich instrumentell zu

bewähren für neue Fragen, neue Perspektiven, in der Tauglichkeit für die Lebensführung (viability, von E. von Glasersfeld 1985). «Empirisches» Wissen wird in gängiger Auffassung bestätigt in dieser lebenspraktischen Brauchbarkeit für Interpretation und Voraussage in dem Konsensus «Wissender» (Reliabilität), der Konvergenz verschiedener wissen-schaffender Erfahrungen (Sinne), in der Invarianz bei Wiederholung.

Wissenschaft – als System geschaffener kognitiver Strukturierungen – wird damit nicht entwertet, nur in ihrer Bedeutung für die «Wahrheitsfindung» relativiert. Dass «die Welt» im Sinne der «realen» Alltagswelt eine Gestaltung (nicht ein Geschöpf!) des menschlichen Bewusstseins ist, diese Ahnung geht im Abendland schon auf die Vorsokratiker zurück und wurde von manchen Philosophen ausgesprochen. Psychologen (J. Piaget 1973), Kommunikationsforscher (G. Bateson 1972, P. Watzlawick 1984), Ethnologen (A. I. Hallowell 1955), Ethologen (siehe evolutionäre Epistemologie), schliesslich Neurobiologen (H. R. Maturana u. F. J. Varela 1987) zeigten den in der Entwicklung wandelbaren, der Anpassung unterliegenden Charakter der kognitiven Strukturen, des «Wissens». Im Konstruktivismus (von E. von Glasersfeld 1985, H. von Foerster 1985, L. Segal 1986) ist die epistemologische Einsicht ausgesprochen: Wahrnehmung und Erkenntnis sind konstruktive Handlungen.

In der Geistesgeschichte Indiens ist freilich eine schon viel ältere Einsicht da, dass die reale Alltagswelt eine Bewusstseinsgestaltung des Menschen sei. Doch occidentale Selbstherrlichkeit (der weisse Europäer an der Spitze menschlicher Evolution), Eurozentrismus als kulturelles Skotom hat Einsichten anderer Völker oft und lange ausgeblendet.

3 Heilkunde und Kultur

«Kultur» ist hier verstanden als «extrem komplizierte, spezifische Verkettung sozial übermittelter Muster, welche die Gefühle, Gedanken und das Verhalten von Individuen in ihren Gesellschaften bestimmen» (A. I. Hallowell 1934). Was als Wissen gilt, was als Wissenschaft, ist von der Kultur bestimmt. Das gilt auch für das Wissen darum, was «krank», was gesund sei, welches Mass und welche Art von Leiden als Beschwerde und Behinderung zur Konsultation einer Therapiegestalt führt. Krankheitsvorstellungen, Ursachenmodelle und Therapiemethoden sind Teile einer jeweiligen Kultur. Medizinsysteme sind kulturelle Subsysteme. Die Kultur bestimmt das Menschenbild, die anthropologischen Grundvorstellungen, welche der Heiler und welche der Patient in die Heilungsinteraktion einbringen. Die Kultur bestimmt die Bereiche normalen und abnormalen Verhaltens und die speziellen Abweichungen, welche die medizinische Psychiatrie als «pathologisch» heraushebt (E. H. Akkerknecht 1971, L. Eisenberg 1988, I. Galdston 1963, A. I. Hallowell 1934, A. M. Kleinman 1973, 1986, Ch. Leslie 1976, J. M. Murphy 1976, D. Offer und M. Sabshin 1974, T. Parsons 1968, H. E. Sigerist 1943, A. Young 1982).

In einem didaktischen Schema kann man die Bereiche, denen der Mensch als inkarniertes Bewusstsein angehört, wie in Bild 1 darstellen. Die naturwissenschaftliche Medizin richtet ihre Perspektive auf den materiell fassbaren Bereich des Menschen. Krankheiten sind morphologische und/oder physiologische Abweichungen der Körperorgane (somatische Medizin). Der materialen Krankheitsauffassung gilt Krankeit als persönlichkeits- und kulturunabhängiges körperliches Geschehen, welches «objektiv» wie ein «Naturgegenstand» beforscht werden kann. Solchem Krankheitsverständnis entspricht eine persönlichkeitsunabhängige typologische Nosologie (P. Diepgen et al. 1969, R. Pophal 1925).

Soweit «biologische» Psychiatrie die «eigentliche» Ursache und Grundlage der Erlebens- und Verhaltensstörungen von Krankheitswert in somatischen, morphologischen, physiologischen, biochemischen, endokrinen, genetischen Pathologien sucht, ist sie ganz diesem naturwissenschaftlich-materialen Ansatz verpflichtet. Sie behält die abendländische Leib-Seele-Spaltung (selbst eine kulturell fixierte Sicht) bei. Soweit sie Bewusstseinsphänomene, experientielle Entwicklungsfaktoren, interaktionelle Vorgänge, transpersonelle Bezogenheit ausklammert, ist solche Psychiatrie einem sehr engen Begriff von Bios verhaftet: sie ist biologistisch.

Psychologische Vorgänge in der Entstehung (und Behandlung) von Krankheiten sind vielfach physikalistisch konzipiert (Freuds Psychoanalyse wurde erst später «psychologisiert») und sprachlich gefasst. Im Behavourismus dominieren Anschauungen, welche an Laborratten gewonnen wurden. Daraus abgeleitete Theorien werden erst sekundär dem Menschen angenähert.

Die psychosoziale Medizin (in Fortentwicklung der ursprünglich vorwiegend intrapsychische Vorgänge hypostasierenden Psychologie) ergänzt die Medizin um die Beachtung interpersoneller, beziehungsdynamischer, kommu-

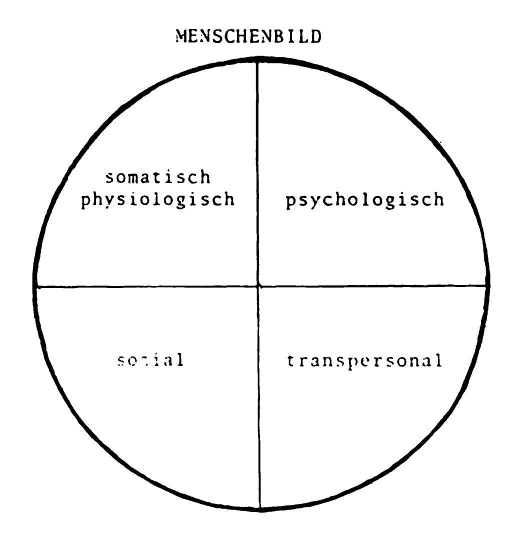


Bild 1 Menschenbild. Didaktische Gliederung der Perspektiven auf den Menschen, die für eine ganzheitliche Medizin zu studieren sind.

Fig. 1 The conception of man – perspectives which have to be taken into consideration for a holistic approach to medicine.

nikativer sowie makro- (gesellschaftlicher) und mikrosozialer (familiärer) Aspekte des Krankseins und Heilens. Aus der Krankheitsgeschichte wird die Krankengeschichte (F. Hartmann 1966). Die personale Krankheitsauffassung bezieht sich vorwiegend auf die postnatale Lebensgeschichte. Die Existenz behinderten, eingeschränkten, defizienten In-der-Welt-Seins in Entwicklung, Austrag, personaler Antwort auf das Schicksal ist «Gegenstand» hermeneutischer Auslegung der medizinischen Anthropologie (P. Christian 1969). Eine ausschliessliche Beschränkung auf psychologische Denkmodelle (z.B. Mangel an mütterlicher Liebe und Fürsorge und fehlende elterliche Achtung als «Ursache» von Persönlichkeitsvarianten bis zu Krebsleiden) wird zu einer psychologistischen Ideologie, welche die körperlichen Entwicklungsmöglichkeiten und Behinderungen (z.B. die Teilleistungsstörungen bei Hirnschäden, genetische Prädispositionen) missachtet. So können psychosomatische Denkansätze überbeansprucht werden (z.B. Psychogenese des Krebses ohne Beachtung der materiellen cancerogenen Noxen). Soziokulturelle Ideologien sind gefährdet, Krankheiten nur mehr als Sozial- und Kulturprodukt zu deuten und sie als lebenspraktische Aufgabe des Heilens und Betreuens zu verleugnen, indem sie als soziale Ausstossung bewirkende bösartige Etikettierung oder als mehr oder weniger freiwilliger Austritt aus einer unerträglichen gesellschaftlichen Norm deklariert werden (Antipsychiatrie).

Die transpersonale Psychologie greift kulturgeschichtlich ältere Krankheitsdeutungen auf: Peri- und antenatale «Erfahrungen» des intrauterinen Lebens und der Geburtsvorgänge werden zum Grundmodell aller späteren Psychopathologien (St. Grof 1978). Das persönlich Unbewusste Freuds, von Jung ergänzt um das kollektive und stammesgeschichtliche Unbewusste, wird durch das peri- und antenatale «Unbewusste» angereichert. Auch die alte Reinkarnationslehre wird aufgegriffen: Antekonzeptionelle Ereignisse in früheren Existenzen werden in diesen explanatorischen Krankheitsmodellen für die Ursachendeutung herangezogen (St. Grof 1978).

Der nicht mehr auf die Sozietät bezogene (darum spanisch «lo asociál»), auf die Transzendenz ausgerichtete Bewusstseinsbereich, welcher im Heilweg meditativer Bewusstseinsentwicklung mystischer Erlösungsreligionen kultiviert wird, erhält in der humanistischen Psychologie Maslows als Ziel einer ganzheitlichen Menschheitsentwicklung Achtung und Wert. Sofern aber Krankheitsereignisse (es geht besonders um die sogenannte Schizophrenie) als verkappte religiöse Durchbruchserlebnisse und spirituelle Krisen gedeutet werden, ist die Gefahr einseitiger explanatorischer Deutungen unter Ausblendung körperlicher, psychologischer, sozialer Bedingungen des Krankwerdens und Krankseins gegeben. Dann wird auch versäumt, ein ganzheitliches bedürfnisangepasstes Heilungsangebot an den Patienten heranzutragen.

Kulturevolutiv ältere Krankheitsvorstellungen aus der schamanistischen Kulturstufe (animistische Deutungen von Seelenraub und Krankheitsgeistern, Krankheit als Manifestation transintelligibler Kräfte, Geister genannt, Krankheit als Hierophanie, Krankeit als Folge von Sünde) finden sich auch in der

aufgeklärten Zivilisation noch unter der Oberfläche und in manchen alternativmedizinischen Subsystemen. Krankheit als Folge karmischer Verfehlungen zu deuten, umfassender als unerlöste Verblendung durch das Verhaftetbleiben auf niedrigen Stufen der Bewusstseinsentwicklung, ist auch in unserer Kultur anzutreffen. Die Dominanz nur einer Perspektive – auf den materialen, intrapsychischen, sozialen, transpersonalen Bereich – ist für Eingleisigkeiten im Erklären, Diagnostizieren, Behandeln gefährdet.

Ganzheitliche Medizin sollte als Ideal alle Bereiche ins Blickfeld bringen und ihr Gewicht für das individuelle Krankheitsereignis und den bedürfnisangepassten Behandlungsplan abwägen. Ganzheit in diesem Sinne bleibt aber eine Idee, eine ideale Gestalt, die konkret immer nur annäherungsweise erreicht werden kann. Jeder Bereich hat seine eigene Methodik der Beforschung und damit auch eine Begrenzung seiner «wissenschaftlichen» Aussagekraft. Die Medizin ist eine kulturelle Struktur, ein System von Wissen und Handeln (T. Parsons 1968, A.M. Kleinman 1973). Die Kultur bestimmt die Wahrnehmung von «illness» (subjektiv-pathisches Erleben von Infirmität) und ihr Verhältnis zu «disease» (morbus, «objektivierbarer» Aspekt von Krankheit). Die Sozietät und ihre Normen bestimmen die Bedingungen für die Entfaltung von Beschwerdebewusstsein und Heilungssuche, die Rolle des Kranken und Heilers und das Geschehen in der Heilungsinteraktion (T. Parsons 1968). Wer mit welchen Beschwerden zum Kranken wird, wer einen Heiler aufsuchen darf, wie Unheil und Krankheit gedeutet und behandelt werden, das ist Ausdruck der Kultur. «La cura es el ser de la cultura» (F.P. Larraya 1982): Was unter Krankheit, Heilung, Heil verstanden wird, ist Ausdruck der Kultur. Was ein Mensch mit seinem Leid macht, zeugt von seiner Geisteskultur und von der Kultur seiner Sozietät. Wenn der Mensch einem Idealnormenbegriff von Gesundheit als optimalem Wohlbefinden, gar Glück anhängt und darauf Anspruch erhebt und wenn er die Normalität des Leidens (M. Eliade 1949) im menschlichen Leben verleugnet und nicht annimmt, wie es die westliche Zivilisation tut, so wird das Bestreben da sein, jedwelches Unwohlsein, jedes Lebensleid, jede Beschwerde, immer mehr Lebensprobleme zu medikalisieren, zu psychologisieren und zum Anlass zu nehmen, es durch technisches Machen (physkalistisch, psycho-soziotherapeutisch) zu beseitigen.

4 Die «Normalität des Leidens» ruft nach einem vielschichtigen Therapieangebot

Das Leben vieler Einzelner und der Menschheit im Ganzen ist voller «Unheil», ist mühevoll, beladen mit Konflikten und Problemen, Entbehrungen und Verzicht, Trauer, Angst und Schmerz. Das Leben der Wesen, menschlicher und aussermenschlicher, ist leidvoll, ist dukkha. Die Antwort auf diese Einsicht sind die Erlösungsreligionen, welche Leidbefreiung, Salvation, Heil

als Ziel vorführen und Wege dazu weisen. Die Antwort auf die «Normalität des Leidens» (M. Eliade 1949) im ausserreligiösen Bereich der säkularisierten Gesellschaft ist ein vielschichtiges Heilungsangebot. Neben dem Schamanen gab es mannigfache koexistierende nicht-schamanische Heilpraktiker: Herbalisten, Naturalisten, Knochen- und Gelenkeinrichter, Zahn-, Augenspezialisten, Hebammen. Glaubens- und Gebetsheiler, Heilpriester wirken z.T. herumziehend, oder in Tempeln. Magische Heiler (Siddhas in Indien), Palmisten, Astrologen wirken teils curativ, teils als Lebensberater. Das indische Ayurveda (das ist die Wissenschaft vom Leben, C. Scharfetter, 1978) und in manchen Zügen auch die chinesische Medizin (P. Unschuld 1978) verstehen sich als Gesundheitskunde – und in diesem Rahmen erst als Heiler. Alle diese Heiler und Berater repräsentieren Heilungssubsysteme mit unterschiedlichen expliziten oder impliziten Konzepten über Entstehung und Behebung von Beschwerden. Zu welchen Heilern ein Patient geht, hängt von den Beschwerden, vom Laienwissen über die Zuständigkeit und vom Heilungsangebot ab. Der qualifizierte Heiler weiss um die Grenzen seiner Wirkmöglichkeiten und weist Kranke ab, für die er sich nicht zuständig weiss.

Die grossartigste Heilergestalt schuf sich die indigene Menschheit der präsäkularisierten Kulturen im Schamanen (C. Scharfetter 1985). Der Schamane ist ein vielfältiger Funktionsträger: er ist nicht nur Heiler, sondern sorgt als Mittler zwischen den Menschen und den aussermenschlichen transintelligiblen Kräften für den Bestand seiner Sozialgruppe. Er kann Jagd, Fischfang, Ernte, Fruchtbarkeit von Mensch und Tier beeinflussen. Er kann das Wetter bestimmen. Er kann Vergangenheit und Zukunft sehen. Manchenorts ist er auch Opferpriester und Zauberer. Durch die Vielfältigkeit seiner Macht ist er eine marginale Gestalt seiner Gesellschaft, gebraucht und gefürchtet zugleich. Sein Heilen geschieht in der Kontrolle der Krankheitsgeister, im Auffinden und Zurückholen verlorener Seelen. Seine Macht gewinnt er durch seinen Schutzgeist, seine Gehilfen sind die Hilfsgeister. Das schamanische Heilen ist ein mentales Heilen. Dazu muss der Schamane selbst ein Bewusstseinsspezialist sein.

Er wird dazu durch seine Berufung in Vorzeichen, Träumen, Visionen, durch Selbst-, Familien-, Stammeswahl. Nach der Berufung folgt die Einweihung in einer leidensvollen Zeit von Zerstückelung und Rekonstruktion, in Träumen, Visionen und besonderen Bewusstseinszuständen (Ekstase, Trance). In der Initiation und der folgenden (oft mehrjährigen) Lehre entwickelt der Schamane seine Fähigkeit, aussergewöhnliche Bewusstseinszustände zu induzieren (durch mannigfache pharmakologische und nonpharmakologische Mittel). In der Ekstase hat er die Gabe zur Diagnose, zum durchschauenden Erkennen, und zur Therapie. Er ist dann Wirkstätte des Schutzgeistes, von ihm besessen, oder geht auf die Reise in die Anderwelten, verlorene Seelen wiederzuholen.

Nur ein kleiner Teil des Lebensleides, wegen welchem der Schamane gebraucht wird, sind Krankheiten im Sinne der heutigen occidentalen Medi-

zin. Im historischen Prozess der Entwicklung der Medizin zum hauptsächlichen Heilsystem wurden die biomedizinischen Probleme als Krankheiten ausgesondert. Die Grenzen dieses Bereiches zu den allgemeinen Lebensproblemen sind nicht scharf. Und die Medizin erweitert den Bereich der «Krankheiten» ständig, für die sie Heilung anbietet. Immer mehr Lebensschwierigkeiten werden medikalisiert, mit dem Aufkommen der psychosozialen Interpretation auch psychologisiert – und werden so dem Corpus expertengetragenen Therapieangebotes hinzugefügt. In gleichem Masse, wie das Feld wächst, für das der Mediziner, Psychiater, Psychotherapeut seine Heilsofferte gibt, nimmt der Einflussbereich nicht-akademischer Heilsysteme ab. Verschwunden sind diese Alternativ-, Naturheiler, Handaufleger und Hypnotiseure aber auch in unserer Kultur noch nicht. Je mehr Mediziner um ihre Klientel bangen, um so härter wird die Marginalisierung, gar Illegalisierung anderer Heiler. Doch gibt es Anzeichen dafür, dass die naturwissenschaftliche Medizin den Erwartungen der heilungssuchenden Bevölkerung vielfach nicht entsprechen kann, teils weil die ärztliche Kunst und Begabung in der Verschulung zu kurz kommt, teils wegen des Zeitdruckes viel beanspruchter Mediziner in Kliniken und Kassenpraxen, in welchen das so wichtige Beziehungsangebot zu kurz kommt (H. Spiro 1986). Medikalisierung und Therapieversprechen können falsche Erwartungen in der Klientel wecken; z. B. die Einstellung, die zum Morbus gemachte «Depression», die man hat oder die einen hat, durch Expertentechnik zu beseitigen – statt zu fragen, wie falsche Erwartungen an ein leidfreies Leben, das alle Bedürfnisse stillen solle, in ein letztlich selbstinduziertes Be-leidigt-sein führen kann.

«Der Mensch allein – Grund genug, traurig zu sein», so lautet ein griechischer Spruch. Das Leben gibt immer Anlässe, bedrückt zu sein, wenn die Bereitschaft zu dieser Reaktion da ist. Epiktet wird der Satz zugeschrieben: «Es sind nicht die Dinge, die uns bedrücken, sondern unsere Sicht der Dinge.» Nicht das zur Bedrückung führende Motiv oder ein hypostasierter morbus ist zu beseitigen, sondern die Perspektive, die Einstellung wäre zu ändern.

5 Die Sozialgeschichte der Medizin als Profession mit Heilungsmonopol

Im ursprünglichen (und z. T. in unserer Zeit noch überlebenden) vielschichtigen Heilerangebot gab es noch keine definierte geschlossene Profession, keine einheitliche theoretische Grundlage, Selektion, Legitimationskriterien. Mit dem Aufkommen der naturwissenschaftlichen Medizin begann der Prozess der Professionalisierung (E. Freidson 1970, P. Unschuld 1974). Die Medizin als Profession: als Beruf mit einer dominanten Position in der Verfügung über die Mittel (Krankheitskonzept, Diagnose, Therapie) und mit Arbeitsteilung. Diese drängte andere Heiler, besonders weibliche, in untergeordnete Hilfsberufe. Die Profession bildet einen Stand (Kaste) mit Autonomie, eigener

Standesordnung, Ethik und Deontologie. Dies erlaubt die Selbststilisierung als ausserordentlich ehrenwert und vertrauenswürdig hinsichtlich Wissen, Kȫnnen, Moral. Der professionalisierte Arzt ist allein kompetenter Experte für Gesundheit, Krankheit, Therapie, Prophylaxe. Der Stand manipuliert das Wissen durch Zulassung zur Schulung, Sprache, Ausübungsgenehmigung. Die Medizin als kultureller Machtfaktor definiert die Natur der Realität, mit der sie sich abgibt. Sie formuliert Laienprobleme in professionelle soziale Realität («Krankheit») um. Sie bestimmt selbst den Umgang mit Klienten und mit ihren Problemen. Mit dem Monopolanspruch der Experten werden konkurrierende Heilsysteme marginalisiert, gar illegalisiert.

Die Begründung ist vorwiegend die «naturwissenschaftliche Grundlage», bauend auf einem mechanistischen Welt- und Menschenbild, epistemologisch ein empirischer Positivismus. Verschwiegen werden dabei marktwirtschaftliche Interessen von Ärztestand und Industrie. Das naturwissenschaftliche Paradigma bedeutet nicht nur ein kulturelles System von Methoden, Begriffen, Definitionen. Es ist auch normativ und damit ausschliessend gegenüber andersartigen Begründungen und Methoden. Das naturwissenschaftliche Paradigma leistet nicht die Erhellung der individuell-biographischen Bedingungen des Krankseins, der sozialen Folgen langfristiger Gebrechen, der sozialpsychologischen Elemente der Arzt–Patient-Beziehung (C. von Ferber 1975).

In Medikalisierung und Psychologisierung von immer mehr Lebensproblemen manifestiert sich der Monopolanspruch der Medizin als alleiniger Heilberuf, als Wissenschaft, als Beherrscher des Gesundheitsmarktes. Das treibt die konkurrenzierenden Subsysteme des Heilungsangebotes, Alternativmedizin, «Erfahrungsmedizin» u.v.a., welche nach Ursprung, Anthropologie, Theorie, Heilmethode sehr verschieden sind, ins Abseits (P. Unschuld 1976). In ihrer Opposition stilisieren diese sich vielfach hoch zu «wahren» Kennern und Vermittlern vom «Wesen» von Mensch in Gesundheit und Krankheit und ihrer Heilung. Sie appellieren an und wecken «ganzheitliche» Betreuungsbedürfnisse. In der Psychiatrie stellen manche paramedizinische «Hilfsberufe», Psychologen verschiedener Schulen, Sozialarbeiter, Pfleger, Leibtherapeuten und andere den Monopolanspruch der Mediziner als Heiler in Frage. Neuerdings bewerben sich gar Philosophen um den Markt der Ratsuchenden.

6 Heilungsinteraktion – Kooperation und versus Autismus

Ein Mensch mit einem (allgemeinen oder lokalen) Funktionsausfall, getroffen von Leid, Unheil, Beschwerde, von Infirmität erhält nach kulturimmanenten Normen die Legitimisierung zur Einnahme der Krankenrolle, darf mit Beschwerdebewusstsein und Behandlungsbedürfnis einen Heiler aufsuchen (T. Parson 1968, D. Robinson 1971, D. Mechanik 1962, A. Young 1982). In

Schmerz, Angst, Bedrückung, mit Hoffnung sucht er Hilfe und bringt sich mit all dem und einem (zunächst unbestimmten) Potential an Heilungsbereitschaft und -fähigkeit in die Begegnung mit dem Heiler ein. Dieser bringt mit seinem Hilfsangebot sich selbst, seine ganze Entwicklung, Schulung, Erfahrung, seine Lebenseinstellung, sein Menschenbild, seine Kultur ein. Die Heilungsinteraktion ist ein kulturell determiniertes intersubjektives, symbolträchtiges (D. Sandner 1979) Geschehen, mehr als ein schulisch-technisches Machen (R. N. Wilson 1963).

Der Patient muss fähig und willens sein, in der Heilsinteraktion in einer heilungsfördernden Weise mitzuarbeiten. Krankheitsuneinsichtige Patienten können das nicht. Manche verleugnen den Krankheitswert ihrer Erlebnisse und ihres Verhaltens. Andere sind so in eine der Common-sense-Realität entrückte Sonderwelt (Derealisation, Autismus) eingetaucht, dass sie nicht im Heilungsprozess mithelfen können. So sind viele Psychiatriepatienten – und entsprechend schwer ist dann die Aufgabe der Betreuer, mit diesen eine zwischenmenschliche Atmosphäre zu gestalten, in welcher sie sich reorganisieren und eine intersubjektiv kommunikable Welt mitkonstituieren können, in einer Weise, die ihnen im Rahmen ihrer sozio-kulturellen Bedingungen eine eigene Lebensgestaltung wiederzugewinnen ermöglicht.

7 Gemeinsame Wirkfaktoren in der Heilungsinteraktion. Heilung als Versöhnung

Die Heilungsinteraktion wird getragen von Handlungen (z. B. Operation, Massage, Sprache, Ritual, Medikamentengabe). In diese geht Affektives und Kognitives ein. Dies sind die drei Pfeiler Actio, Emotio, Cognitio der Common-factor-Forschung (J. D. Frank 1981, 1986, E. F. Torrey 1972, J. Rösing 1987). In Empathie und Sympathie kommunizieren (im optimalen Fall) Klient und Heiler. Hoffnung, Erwartung, Vertrauen, Aufgehobensein ermöglichen die Lösung von Angst, Schmerz, Misstrauen. Im günstigen «Zwischen» (M. Buber 1965) von Patient und Therapeut kann sogar eine psychotische Reaktionsweise aufgegeben werden, kann selbst das «zertrümmerte Bewusstsein» des Ich-Kranken (K. W. Ideler 1838) sich mit seinen Selbstheilungskräften wieder reorganisieren.

Der Patient bringt Vorstellungen und Wissen ein (Laienkonzept) von seiner Person, seinem Körper, seinem Lebenslauf (intrapersoneller Wissenskreis), von seinem sozialen Stand und Netzwerk (interpersoneller Wissenskreis), von seiner Wert-, Glaubenswelt, von Sünde, Busse, Strafe (transpersonelles Wissen). In der Interaktion mit dem Heiler werden diese Wissenskreise geklärt, verdeutlicht, strukturiert, korrigiert, erweitert – und berühren einander. Sie erfahren untereinander eine Sinnverknüpfung (J. Rösing 1987).

In diesem Sinn ist Heilung ein lebenswirksames, also potentiell Wandlung ermöglichendes Herstellen von kommunikablen und tatsächlich kommuni-

zierten, in actio sich vollziehenden, in emotio sich auswirkenden, in cognito angestossenen und integrierten Wissenskreisen um die (intra-, inter-, transpersonell) gegebenen Bedeutungen, Sinnhaftigkeiten. Der Heilvorgang enthält einen Einstellungs-, Haltungs-, Perspektivenwechsel, welcher Reorganisation, Resynthese, Reintegration ermöglicht – Versöhnung in der symbolischen Heilung (J. Rösing 1987, D. Sandner 1979).

Der Therapeut ist Medium dieses Prozesses. Therapieren erfordert den Einsatz des ganzen Lebens, der Existenz des Therapeuten. Therapieren ist ein existentielles Sichzurverfügungstellen. Der Therapeut darf dabei selbst – wie eine Gegengabe – Impulse für das eigene Wachstum und die Entwicklung seines Bewusstseins erfahren. So ist bei solchen Therapien Geben und Nehmen auf beiden Seiten. Patient und Therapeut wachsen in der Versöhnung mit den eigenen inneren Kräften, mit der Gemeinschaft, mit der Natur, mit dem Schicksal des Menschen im Kosmos. Zu diesem Therapieren als Lebenlernen gehört auch das Loslassen von allen Verhaftungen, als Vorbereitung für das Sterben. So wird der Weg frei von der Curation zur Salvation, vom Heilen zum Heil.

8 Literatur

Ackerknecht E.H. (1971): Medicine and ethnology, Huber, Bern.

Bateson G. (1972): Steps to an Ecology of Mind, Ballantine Books, New York.

Buber M. (1965): Das dialogische Prinzip, Schneider, Heidelberg.

Christian P. (1969): Medizinische und philosophische Anthropologie, S. 232–278 in: F. Büchner, E. Letterer, F. Roulet (Hrsg.), Prolegomena einer allgemeinen Pathologie, Bd. 1 des Handbuches der Allgemeinen Pathologie, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Diepgen P., Gruber B.G., Schadewald H. (1968): Der Krankheitsbegriff, seine Geschichte und Problematik, S. 1–50 in: F. Büchner. E. Letterer, F. Roulet (Hrsg.), Prolegomena einer allgemeinen Pathologie, Bd. 1 des Handbuches der Allgemeinen Pathologie, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Einstein A. (1934): On the method of theoretical physics (1934). Zit. bei Eisenberg.

Eisenberg L. (1988): The social construction of mental illness. Psychological Medicine 18, 1–9.

Eliade M. (1949): Kosmos und Geschichte, Insel, Frankfurt.

Ferber C.v. (1975): Soziologie für Mediziner, Springer, Heidelberg.

Förster H.v. (1985): Entdecken oder Erfinden? Wie lässt sich Verstehen verstehen? S. 27–68 in: Einführung in den Konstruktivismus, Oldenburg, München (Schriften der Carl-Friedrich-von-Siemens-Stiftung, Bd. 10).

Frank J.D. (1981): Die Heiler, Klett-Cotta, Stuttgart. (Orig. 1961.)

Frank J.D. (1986): Psychotherapy – the transformation of meanings: discussion paper, J. of the Royal Society of Medicine 79, 341–386.

Freidson E. (1970): Profession of medicine, Dodd Mead, New York.

Galdston I. (1963): Man's image in medicine and anthropology, Int. University Press, New York.

Glasersfeld E.v. (1985): Konstruktion der Wirklichkeit und des Begriffs Objektivität, S. 1–26 in: Einführung in den Konstruktivismus, Oldenburg, München (Schriften der Carl-Friedrich-von-Siemens-Stiftung, Bd. 10).

Goodman N. (1978): Ways of worldmaking, Hackett, Indianapolis, Cambridge.

Grof St. (1978): Topographie des Unbewussten, Klett-Cotta, Stuttgart.

Hallowell A.I. (1934): Culture and mental disorder, J. of abnormal and social psychology, 29 (1934/35), 1–9.

Hallowell A.I. (1955): Culture and experience, Univ. Pennsylvania Press, Philadelphia.

Hartmann F. (1966): Krankheitsgeschichte und Krankengeschichte, Marburger Sitzungsberichte 87, 17–32.

Ideler K. W. (1838): Grundriss der Seelenheilkunde, Enslin, Berlin.
Kleinmann A. M. (1973): Toward a comparative study of medical systems: an integrated approach to the study of the relationships of medicine and culture, Science Medicine & Man 1, 55–65.
Kleinmann A. M. (1973): Medicine's symbolic reality, On a central problem in the Philosophy of Medicine Inquiry 16, 206–213.
Kleinmann A. M. (1986): Anthropology and Psychiatry. The role of culture in cross-cultural research on illness and care in: R. Rosenberg, F. Schulsinger, E. Stroemgren (Ed.), Psychiatry and its related disciplines. World Psychiatric Association, Copenhagen.
Larraya F. P. (1982): Lo irracionâl en la cultura, vol. 1–4, Fundación para la educación, la ciencia y la cultura, Buenos Aires.
Leslie Ch. (Ed.) (1976): Asian medical systems: a comparative study, Univ. of California Press, Los Angeles.
Lurija A. R. (1986): Die historische Bedingtheit individueller Erkenntnisprozesse, VCH, Weinheim, Basel.
Maslow A. A. (1973): Psychologie des Seins, Kindler, München.
Maturana H. R., Varela F. J. (1987): Der Baum der Erkenntnis, Schwerzer, Bern, München, Wien.
Mechanik D. (1962): The concept of illness behaviour, J. chron. Dis. 15, 189–194.
Murphy J. M. (1976): Psychiatric labelling in cross-cultural perspective, Science 191, 1020–1028.
Offer D., Sabshin M. (1974): Normality, Theoretical and clinical concepts of mental health, Basic Books, New York.
Parsons T. (1968): Sozialstruktur und Persönlichkeit, Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt.
Piaget J. (1973): Einführung in die genetische Erkenntnistheorie, Suhrkamp, Frankfurt a. M.
Pophal R. (1925): Der Krankheitsbegriff in der Körpermedizin und Psychiatrie, Abhandlungen aus der Neurologie, Psychiatrie, Psychologie, No. 30/31, Karger, Berlin.
Popper K. R. (1963): Conjectures and refutations, Basic books, New York.
Rilke R. M.: Duineser Elegien, 1. Elegie, Insel, Frankfurt 1948.
Robinson D. (1971): The process of becoming ill, Routledge Kegan Paul, London.
Rösing J. (1987): Die Verbannung der Trauer, Greno, Nördlinger.
Sandner D. (1979): Navahio symbols of healing, Harcourt, New York.
Scharfetter C. (1976): Ayurveda, Schweizerische Medizinische Wochenschrift 106, 565–571.
Scharfetter C. (1985): Der Schamane: Zeuge einer alten Kultur – wieder belebbar? Schweizer Archiv für Neurologie, Neurochirurgie, Psychiatrie 136, 81–95.
Segal L. (1986): Das 18. Kamel oder Die Erfindung der Welt; Zum Konstruktivismus Heinz von Försters, Piper, München.
Siegler M., Osmond H. (1974): Models of madness, models of medicine, McMillar, New York.
Sigerist H. E. (1943): Civilisation and disease, University of Chicago Press, Chicago.
Spiro H. (1986): Doctors, patients and placebos, Yale University Press, New Haven.
Torrey E. F. (1972): The mind game, witch-doctors and psychiatrists, Emerson Hall Publ., New York.
Unschuld P. (1974): Professionalisierung im Bereich der Medizin, Saeculum 25, 251–276.
Unschuld P. (1976): Western medicine and traditional healing systems: competition, cooperation or integration Ethics in Science and Medicine 3, 1–20.
Unschuld P. (1978): Chinesische Medizin in H. Schipperges, E. Seidler, P. U. Unschuld, Krankheit, Heilkunst, Heilung, Alber, München.
Young A. (1982): The anthropologies of illness and sickness, Annual review of Anthropology 11, 257–285.
Watzlawick P. (Hrsg.) (1984): Die erfundene Wirklichkeit, Piper, München.
Wilson R. N. (1963): Patient-practicioner relationship, p. 273–295 in: H. E. Freeman, S. Levine, L. G. Reeder (Ed.), Handbook of medical sociology, Engleword Cliffs, Prentic-Hall.

Prof. Dr. med. Ch. Scharfetter, Psych. Universitätsklinik, Lenggstrasse 31, CH-8029 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich *134*/1: 67–80

Die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)[1] Einführung und Folgerungen

Elias Landolt, ETH Zürich

Die Naturforschende Gesellschaft in Zürich führte am 15. Februar 1988 ein vielbeachtetes Podiumsgespräch über die Umweltverträglichkeitsprüfung durch. Die drei Vorträge und die anschliessende Diskussion sollten die Möglichkeiten und den Anwendungsbereich der im Bundesgesetz über Umweltschutz vorgesehenen Umweltverträglichkeitsprüfung aufzeigen. Im Art. 9, Absatz 1 dieses Gesetzes wird der Geltungsbereich folgendermassen umschrieben: «Bevor eine Behörde über die Planung, Errichtung oder Änderung von Anlagen, welche die Umwelt erheblich belasten können, entscheidet, prüft sie die Umweltverträglichkeit; der Bundesrat bezeichnet diese Anlagen.» Die Anwendung des UVP steht noch im Versuchsstadium. Die Verordnung des Bundesrates, die den obligatorischen Anwendungsbereich vorschreiben soll, ist erst Ende 1988 erlassen worden. Die nachstehenden Referate sollen einen ersten Überblick über die Methodik und über die Erfahrungen in der Privatwirtschaft und in der Verwaltung ergeben. Der Verfasser dieser Einführung möchte die Bedeutung der UVP aus eigener Sicht folgendermassen zusammenfassen:

1. Die UVP zwingt die Projektgesuchsteller und die Behörden, sich intensiv und umfassend mit den direkten und indirekten Auswirkungen des Projektes auf die Umwelt zu befassen. Dies hat den Vorteil, dass die Eingriffe in die Umwelt sorgfältig abgeklärt, in einem grösseren Zusammenhang erkannt und allenfalls minimalisiert werden können. Vom Projektunternehmer her hat sie den Nachteil, dass die Projektverwirklichung verzögert, verteuert oder überhaupt verunmöglicht wird. Damit erhält die private Initiative einen Dämpfer. Angesichts der heutigen hohen Belastungen der Umwelt und den damit verbundenen sich langfristig einstellenden Destabilisierungsproblemen unserer Ökosysteme muss eine Einschränkung der unternehmerischen Freiheit und allenfalls auch unseres Wohlstandes in Kauf genommen werden, wenn auf diese Weise die zunehmende Verschlechterung unserer natürlichen Lebensbedingungen aufgehalten werden kann. Die doch vorwiegend positiven Auswirkungen der UVP lassen es auch als angezeigt erscheinen, dass der Kanton über eigene Projekte, die sich auf die Umwelt auswirken, freiwillig eine UVP durchführen lässt, auch wenn sie vom Bund nicht vorgeschrieben wird.

2. Die Erstellung der UVP, die vom Projektunternehmer zu veranlassen und zu bezahlen ist, stellt an die ausführenden Fachbüros hohe fachliche Ansprüche, ein weitgehendes Umweltverständnis und Kenntnisse der vielschichtigen Zusammenhänge unseres ökologisch-ökonomischen Umweltsystems. Auch muss der UVP-Ersteller gegenüber seinem Auftraggeber Unabhängigkeit bewahren, um Gefälligkeitsgutachten zu vermeiden. Umgekehrt muss auch die beurteilende Behörde über genügend ausgewiesene Fachvertreter und kompetente Fachstellen verfügen, damit sie die Vollständigkeit des Berichtes überprüfen und die Folgerungen nachvollziehen kann. Erst dadurch ist ein verantwortungsbewusster Entscheid der Behörde möglich. Aus diesen Gründen ist eine UVP im Kompetenzbereich von kleineren Gemeinden fragwürdig.

3. Die UVP, so positiv ihre Auswirkungen auch sind, kann selbstverständlich weder fehlende noch unzweckmässige Planung ersetzen oder langfristig das Problem unserer Umweltbelastung lösen. Dazu braucht es stärkere Einschränkungen in unserem Verhalten der Umwelt gegenüber und ein Umdenken in unseren Wertvorstellungen. Immerhin ist die UVP ein wirksames Instrument in der Hand einer verantwortungs- und umweltbewussten Behörde, um den Verschleiss unserer Umweltgüter zu mildern und sich über die schwerwiegenden Folgen der Eingriffe in unsere Lebensgrundlagen Rechenschaft abzulegen.

Prof. Dr. Elias Landolt, Geobotanisches Institut der ETH, Zürichbergstr. 38, 8044 Zürich

---

[1] Ergebnisse eines Vortrags- und Diskussionsabends in der NGZ (15. Februar 1988)

Grundsätze des methodischen Vorgehens bei Umweltverträglichkeitsprüfungen

Willy A. Schmid, ETH Zürich

Gemäss Umweltschutzgesetz, Art. 9, ist für Anlagen, für die erhebliche Umweltauswirkungen zu erwarten sind, eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen[1]. Somit wird eine objektbezogene Umweltverträglichkeitsprüfung durch den Gesetzgeber verlangt. Sie bezieht sich auf die Projektierung von Anlagen an einem gegebenen Standort zu einer gegebenen Zeit. Obschon die UVP nach schweizerischem Recht objektbezogen ist, ist sie gedanklich wesentlich weiter zu fassen, als dies das Resultat einer UVP aufzeigt. Die laufende Überprüfung eines Vorhabens hinsichtlich seiner Umweltauswirkungen hat sinnvollerweise schon zu Beginn der Planungs- und Projektierungsphase, bei der ersten Projektidee einzusetzen und ist dann fortzuführen vom Vorprojekt über das generelle Projekt, die Detailprojekte, die Realisierung des Projekts bis hin zum Betrieb der Anlage. Die UVP wird somit zum eigentlichen Projektierungsinstrument.

Die UVP begründet nach dem Willen des Gesetzgebers kein neues Recht, sondern soll in einer Gesamtschau alle Auswirkungen einer Anlage auf die Umwelt aufzeigen und deren Beurteilung hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit erlauben. Es wäre aber ein verhängnisvoller Irrtum zu meinen, Normen des nominalen und funktionalen Umweltschutzrechtes kämen erst bei einer UVP voll zum Tragen[2]. Die gesetzlichen Normen gelten immer und überall mit und ohne UVP. Die UVP hat lediglich die Funktion des Tatbeweises.

Im folgenden soll nicht auf den Verfahrensablauf einer UVP im Rahmen des massgeblichen Verfahrens eingetreten oder der Frage nach der Grenze zwischen umweltverträglich und nicht umweltverträglich nachgegangen oder materielle Problemstellungen näher behandelt werden, obschon dies eminent wichtige Fragen sind; sondern es soll das methodische Konzept der UVP verdeutlicht werden.

So wenig wie *die* Umwelt existiert, besteht auch nicht *die* Methode der UVP. Die Beschreibung der Umwelt und die zu wählenden Methoden sind im wesentlichen eine Frage des Betrachtungsstandpunktes und vor allem der Problemstellung. Beide, die Beschreibung der Umwelt und die Methode zur Ermittlung und Beurteilung der Umweltauswirkungen, haben problemorientiert zu erfolgen. Jedoch besteht durchaus ein methodisches Grundkonzept der UVP, auf das sich die Methoden zurückführen lassen[3].

1. Methodisches Konzept der UVP

Um eine Anlage hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit prüfen zu können, müssen deren Umweltauswirkungen bekannt sein. Im Zentrum der UVP zur Ermittlung der Umweltauswirkungen steht somit die prognostische Wirkungsanalyse für eine projektierte Anlage. Sie soll Auskunft

---

[1] Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz USG) vom 1. Okt. 1983, Art. 9. Art. 9 weist darauf hin, dass das Verfahren der UVP in einer Verordnung zu regeln ist und zudem der Bund Richtlinien zur Ausarbeitung von UVP's erarbeiten soll. Die UVP-Verordnung ist am 19. Oktober 1988 herausgekommen, die Richtlinien liegen im Entwurf vor.

[2] Unter nominalem Recht sind jene Gesetzesnormen zu verstehen, die im entsprechenden Gesetz, hier das Umweltschutzgesetz, aufgeführt sind. Das funktionale Recht umfasst alle Normen, die für den entsprechenden Sachbereich relevant sind, hier alle umweltrelevanten Normen.

[3] Zum Grundkonzept des methodischen Vorgehens vgl. Schmid, W.A., 1987: Zur Methodik der Umweltverträglichkeitsprüfung, in: Brodbeck, U., Forster, D., Ischer, G., Wyler, M. (Hrsg.), Die Umweltverträglichkeitsprüfung, Publikationen der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft Nr. 1, Bern, Stuttgart.

über die ursächlichen Zusammenhänge zwischen Wirkungen der Anlage und Auswirkungen auf die Umwelt geben. Dabei stellen sich zwei Probleme. Einmal sind Wirkungen und Umweltauswirkungen ursächlich miteinander zu verknüpfen, zum andern gilt es, die Struktur der Umwelt derart zu beschreiben, dass Wirkungen der Anlage zu den entsprechenden Umweltauswirkungen führen.

1.1 Das Wirkungen/Auswirkungen-Modell

Das mehrstufige Wirkungsschema, in dem die kausalen Zusammenhänge zwischen Wirkungen und Auswirkungen dargestellt sind, stellt also nichts anderes als ein Modell dar, eine vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit, mit Hilfe dessen für eine gegebene Anlage die Umweltauswirkungen ermittelt werden. Bild 1 verdeutlicht für das Beispiel der Sonderabfalldeponie in sehr schematischer und vereinfachter Form ein solches Wirkungsschema als Modell zur Ermittlung der Umweltauswirkungen. Aus diesem Schema geht hervor, dass es sich um eine zweistufige Wirkungskette handelt, bei der auf der 1. Stufe eine ressourcenbezogene (Luft, Boden, Wasser) und auf der 2. Stufe eine raumbezogene Beschreibung der Umwelt erfolgt. Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, dass solche Modellbildungen problemspezifisch, hier für die Sonderabfalldeponie, zu entwickeln sind, und zwar derart, dass sich die spezifischen Fragestellungen beantworten lassen[4].

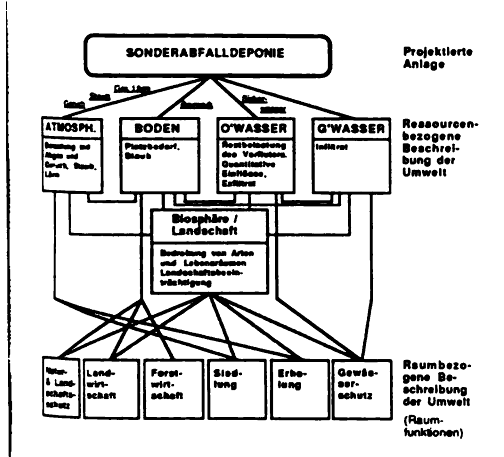


Bild 1 Wirkungsschema einer Sonderabfall-Deponie als Modell für eine UVP

1.2 Ermittlung der zu untersuchenden Fälle und der Anfangs- und Randbedingungen

Durch das Wirkungen/Auswirkungen-Modell sind die Zusammenhänge zwischen Wirkungen der Anlage und daraus resultierenden Umweltveränderungen beschrieben. In der Folge geht es darum, zu bestimmen, welche Fälle zu untersuchen, d.h. für welche Wirkungen welche Auswirkungen unter welchen Anfangs- und Randbedingungen zu ermitteln sind. Es sind somit mittels des WITH-WITHOUT-Prinzips folgende Fragen zu beantworten (s. Bild 2):

- Über welchen Zeitraum sind Wirkungen der Anlage und ihre Auswirkungen zu betrachten (Betrachtungszeitraum)?
- Welche Intensität haben die Wirkungen und welche Eintretenswahrscheinlichkeit besitzen sie über den gesamten Betrachtungszeitraum gesehen (WITH-Fall)? D.h.: Welche Wirkungen gehen von der Anlage aus im Normalbetrieb der Anlage? Welche Wirkungen sind zu erwarten bei Störfällen und wie gross ist die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens? Welche Störfälle sind als Katastrophenfälle (gem. USG) zu bezeichnen und entsprechend zu berücksichtigen?

---

[4] Vgl. Schmid, W.A. et al., 1986: Konzept zur Vorstudie, Raumverträglichkeit von Sonderabfalldeponiestandorten, ORL-Institut, ETH Zürich (unveröffentlicht).

- Wie gross ist die Belastung der Umwelt vor der Erstellung der Anlage (Ausgangszustand resp. -belastung)?
- Wie wäre die Entwicklung der Umweltbelastung ohne die Erstellung der Anlage über den gesamten Betrachtungszeitraum gesehen (WITHOUT-Fall)?

Der WITHOUT-Fall ist die Referenzgrösse zu den Auswirkungen, die sich aufgrund der Modellrechnung mittels des Wirkungen/Auswirkungen-Modells ergeben. Grundsätzlich sind jene sich aus der Differenz zwischen WITH- und WITHOUT-Fall ergebenden Umweltauswirkungen der zu untersuchenden Anlage zuzurechnen. In der Regel wird es kaum gelingen, sowohl die Umweltbelastungen im WITHOUT-Fall und im WITH-Fall als auch Stör- und Katastrophenfälle mit ihren Eintretenswahrscheinlichkeiten und ihrer Genauigkeit in Funktion der Zeit über den Betrachtungszeitraum darzustellen. Vereinfachungen sind meist nicht nur notwendig, sondern auch zweckmässig.

Bild 2 Das WITH-WITHOUT-Prinzip

1.3 Ergebnisse aus der prognostischen Wirkungsanalyse

Aufgrund der festgelegten Anfangs- und Randbedingungen sind für die zu untersuchenden Fälle im Normalbetrieb, im Störfall und im Katastrophenfall die entsprechenden Umweltauswirkungen der Anlage zu ermitteln.

An diese Resultate aus der Modellrechnung sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Die Resultate müssen in ihrem zeitlichen Bezug interpretierbar sein. D.h.: Sind die entsprechenden Auswirkungen zu jeder Zeit oder erst in 10–20 Jahren usw. zu erwarten?
- Die Resultate müssen in ihrem räumlichen Bezug angegeben werden können.
- Die Resultate müssen sich hinsichtlich ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit interpretieren lassen. Es ist oft nicht möglich, meist auch nicht zweckmässig, hier mit genauen Zahlenwerten zu operieren, doch qualitativ sollte eine Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit möglich sein.
- Die Resultate sollten hinsichtlich ihrer Genauigkeit interpretierbar sein. Auch hier kann es meist nicht darum gehen, präzise quantitative Angaben zur Genauigkeit zu machen, sondern vielmehr geht es darum, Grössenordnungen anzugeben. Dies um so mehr, da Resultate oft nicht als quantifizierte Grössen, sondern nur als qualitative oder gar nur verbale Beschreibungen vorliegen.
- Die Resultate der Modellrechnung haben in einer Form vorzuliegen, die eine Gesamtbeurteilung der Resultate hinsichtlich der Umweltverträglichkeit erlaubt.

.4 Beurteilung der Ergebnisse

Die Beurteilung hat aufgrund des nominalen und funktionalen Umweltschutzrechtes zu erfolgen. Sie ist dort einfach, wo es zu prüfen gilt, ob die entsprechenden Grenzwerte eingehalten sind; komplexer und anspruchsvoller ist die Beurteilung, wenn solche Grenzwerte nicht vorliegen, wie im Bereich des Natur- und Landschaftsschutzes[5].

Aus den Ausführungen zu den zu untersuchenden Fällen, der Ermittlung von Anfangs- und Randbedingungen und den Ergebnissen geht für die Durchführung von UVP's die entscheidende Kenntnis hervor, dass die UVP nicht allein deterministische und/oder statistisch belegbare Wirkungszusammenhänge berücksichtigen muss, sondern auch allein vermutete. Das Ergebnis der UVP ist in diesem Sinne eine Diagnose möglicher Umweltauswirkungen einer Anlage, die zutrifft oder eben nicht zutreffen kann. Es geht demnach in der Beurteilung von Umweltauswirkungen immer auch darum, Risiken abzuwägen.

2. Zur Quantifizierung von Wirkungszusammenhängen

Aufgrund der wirkungs- und strukturbezogenen Betrachtungsweise lässt sich die Struktur des Wirkungen/Auswirkungen-Modells erarbeiten, wie diese für das Beispiel der Sonderabfalldeponie in Bild 1 vereinfacht dargestellt ist. In dieser Abbildung sind zunächst auf der ersten Ebene die Beziehungen zwischen den Emissionen und den Immissionen im abiotischen Bereich (Atmosphäre, Boden, Wasser) aufgeführt. Diese lassen sich in der Regel recht gut mittels mathematischer, physikalischer und statistischer Modelle beschreiben und weitgehend näherungsweise quantifizieren.

Die Veränderungen der abiotischen Ressourcen haben wiederum Auswirkungen im biotischen, landschaftsbezogenen Bereich, der in Bild 1 mit Biosphäre/Landschaft umschrieben ist, zur Folge. Die durch die Ressourcenveränderungen induzierten Veränderungen im biotischen, landschaftsbezogenen Bereich zu ermitteln, ist wesentlich komplexer als im abiotischen Bereich. Es gilt die folgenden zwei Probleme zu bewältigen:

1. Konsequenterweise müsste für jede Pflanzenart, jede Tierart in der betreffenden Region zur Darstellung kommen, wie sie auf Ressourcenveränderungen, wie Schadstoff-Immissionen aus der Atmosphäre, reagieren; wie sich Veränderungen im Bestand einzelner Pflanzenarten und von Tierpopulationen auf die Pflanzengesellschaften und die Tierwelt insgesamt und damit auf die Landschaft als Ganzes auswirken. Ein solches Vorgehen ist aber schon allein aus arbeitsökonomischen Gründen ein hoffnungsloses Unterfangen.

2. Zwar sind viele systemökologische Zusammenhänge zwischen Störfaktoren und Ökosystemveränderungen bekannt, doch ist es immer noch äusserst schwierig, insgesamt das Verhalten von Ökosystemen infolge von Ressourcenveränderungen quantitativ vorauszusagen.

Die Problemlösung besteht nun darin, dass ein Bewertungsmassstab als Wertebene, der die Ziele und Ansprüche der Gesellschaft widerspiegelt, eingeführt wird. Ein solcher Bewertungsmassstab kann z. B. die Einführung von «Roten Listen» für Tiere und Pflanzen sein, mit der klaren Bedingung, dass «Rote Liste-Arten» durch die Ressourcenveränderungen in der betroffenen Region nicht aussterben dürfen.

Mittels des eingeführten Bewertungsmassstabes meist in Form eines Indikatorensystems wird für die entsprechenden Aussagebereiche, die in Bild 1 auf der zweiten Ebene des Wirkungssche-

---

[5] Dazu äussert sich in seiner Einzelarbeit im Rahmen des Nachdiplomstudiums in Raumplanung an der ETHZ Neuenschwander, M., 1987: Interpretation der qualitativ formulierten Normen im Bereich Natur- und Landschaftsschutz für die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Einzelarbeit NDS in Raumplanung. ORL-Institut Zürich.

mas als raumbezogene Beschreibung der Umwelt aufgeführt sind, die Empfindlichkeit gegenüber Störfaktoren (Ressourcenveränderungen) ermittelt[6].

Dank der Einführung von Bewertungsmassstäben gelingt es, die Wirkungen einer Anlage resp. die dadurch hervorgerufenen Veränderungen im abiotischen Bereich (Atmosphäre, Wasser und Boden) in Beziehung zum biotischen Bereich und der Landschaft als Ganzes zu bringen. Eines ist hier festzuhalten: Diese Bewertung der Aussagebereiche hat methodisch gesehen zunächst gar nichts zu tun mit der Beurteilung der Umweltverträglichkeit. Sie stellt lediglich einen Ansatz dar, der erlaubt, quantitativ gestützte Aussagen über schwer quantifizierbare Umweltauswirkungen für die Biosphäre und die Landschaft als Ganzes zu machen. Selbstverständlich beinhaltet aber dieser Bewertungsmassstab die gleichen Kriterien, wie sie zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit eines Vorhabens herangezogen werden müssen. Um die Umweltauswirkungen letztlich ermitteln zu können, gilt es gemäss Bild 3, die Wirkungen der Anlage resp. die durch diese induzierten Ressourcenveränderungen in Beziehung zur Empfindlichkeit des zu betrachtenden Teil-Aussagebereiches zu setzen. Aus dieser Verknüpfung der Empfindlichkeit mit den Wirkungen der Anlage lassen sich die gesuchten Umweltauswirkungen, resp. -belastungen ermitteln. In diesem Zusammenhang ist es wohl zweckmässiger, weniger von Umweltauswirkungen denn von Umweltgefährdungen zu sprechen, da es sich letztlich um eine projektierte und noch nicht realisierte Anlage und dementsprechend um Prognosen handelt. Will man den Aspekt Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Umweltauswirkung betonen, so lässt sich in diesem Zusammenhang auch von Umweltrisiken sprechen.

Das in Bild 3 dargestellte Schema stellt das Grundmuster zur Ermittlung von Umweltauswirkungen dar. Dabei werden die verschiedensten Techniken zur Bestimmung der Umweltauswirkungen eingesetzt. Neben Relevanzmatrixen können dies Simulationsmodelle, Overlay-Methoden und andere sein[7]. Darauf soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

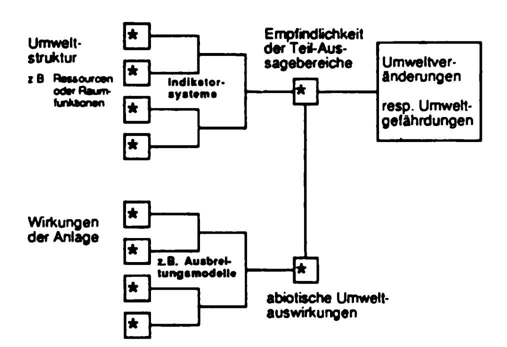


Bild 3 Grundmuster zur Ermittlung schwer quantifizierbarer Umweltauswirkungen

---

[6] In planerischem Sinne ist die Empfindlichkeit eines Aussagebereichs eine Funktion der Empfindlichkeit des Aussagebereichs gegenüber Belastungsfaktoren, dem Bedarf an der ökologischen Leistung des Aussagebereichs und der aktuellen Belastung. Zur ökologischen Definition der Empfindlichkeit vgl. Ellenberg, H., 1972: Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen, in: Tagungsbericht der Gesellschaft für Ökologie, Giessen, S. 19–26.

[7] Eine Zusammenstellung verschiedener UVP-Methoden findet sich in: Gfeller, M. et al., 1984: Berücksichtigung ökologischer Forderungen in der Raumplanung – Methodische Ansätze und Fallbeispiele. ORL-Bericht 46, Zürich. Vgl. auch Folk, M.M., 1982: A Review of Environmental Impact Assessment Methodologies in the United States. ORL-Bericht 42, Zürich.

3. Schlussbemerkungen

Ein einheitliches Vorgehen bei der Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen hat sich noch nicht etabliert. Dies kann nicht erstaunen, da grundsätzlich weder *die* Methode der UVP noch *die* Umwelt bestehen, sondern beide problemorientiert zu definieren sind. Zudem soll die Methodenfreiheit gewährleistet sein, um den Fortschritt in der Entwicklung von UVP-Methoden nicht zu unterbinden.

Aber gerade in dieser Phase der Durchführung unterschiedlicher Pilot-UVP's scheint es als besonders wichtig, sich auf ein methodisches Grundkonzept abstützen zu können. Dieses methodische Grundkonzept, wie es hier in Kürze skizziert ist, muss daher notwendigerweise sehr abstrakt sein. Es hat jene gedankliche Stütze zu bieten, die erlaubt, die verschiedensten Vorgehensweisen bei der Durchführung einer UVP einzuordnen, konzeptionelle Fehler zu entdecken und die Ergebnisse einer UVP «richtig» zu interpretieren. Dieser abstrakte methodische Rahmen ist aber ebenso notwendig, um den Stellenwert der UVP im Rahmen der gesamten Umweltpolitik realistisch einzuschätzen. Umweltpolitik kann nicht identisch mit UVP sein, da durch sie direkt keine umweltpolitischen Massnahmen begründet werden. Umweltpolitik muss viel mehr sein, nämlich der umfassende Vorgang der laufenden Bewältigung der Umweltprobleme durch unser politisches System[8].

---

[8] Diese Formulierung wurde in Anlehnung an Lendi, M. gewählt, der in analoger Weise Raumordnungspolitik definiert als der umfassende Vorgang der laufenden Bewältigung raumrelevanter Probleme durch das politische System. ORL-Institut, 1985: Vademecum der Raumplanung, ORL-Institut Zürich, S. 2.

Prof. Dr. Willy A. Schmid, Institut für Kulturtechnik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Erfahrungen in der Privatwirtschaft mit der Umweltverträglichkeitsprüfung

Christian Zimmermann, Baden

Es besteht noch wenig Erfahrung darüber, wie umfangreich und detailliert Umweltuntersuchungen im konkreten Fall sein sollen, damit der Bericht zur Umweltverträglichkeit eine relevante Entscheidungsgrundlage darstellt und der Kostenrahmen vernünftig bleibt.

Die Verantwortung für die Untersuchungsbreite und -tiefe liegt vorwiegend beim Umweltberater, der vom Gesuchsteller für die Erarbeitung des UVP-Berichtes beauftragt wird. Der Umweltberater soll im Pflichtenheft einen gangbaren Lösungsweg für die Hauptuntersuchungen definieren. Bei der Optimierung dieses Lösungsweges kann er im Spannungsfeld UVP leicht zwischen die Interessen der anderen Beteiligten geraten. Fachkompetenz und Verantwortung bei der Gesetzesinterpretation, Erfahrung mit den Beteiligten des UVP-Verfahrens und umweltpolitische Verantwortung für das Instrument UVP sind wichtige Voraussetzungen für seine Arbeit. Um etwas zu bewirken, ist er aber auch auf ein gut funktionierendes menschliches Beziehungsnetz im Spannungsfeld UVP angewiesen.

Dr. Christian Zimmermann, Motor Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5400 Baden

Erste Erfahrungen der Verwaltung mit der Umweltverträglichkeitsprüfung

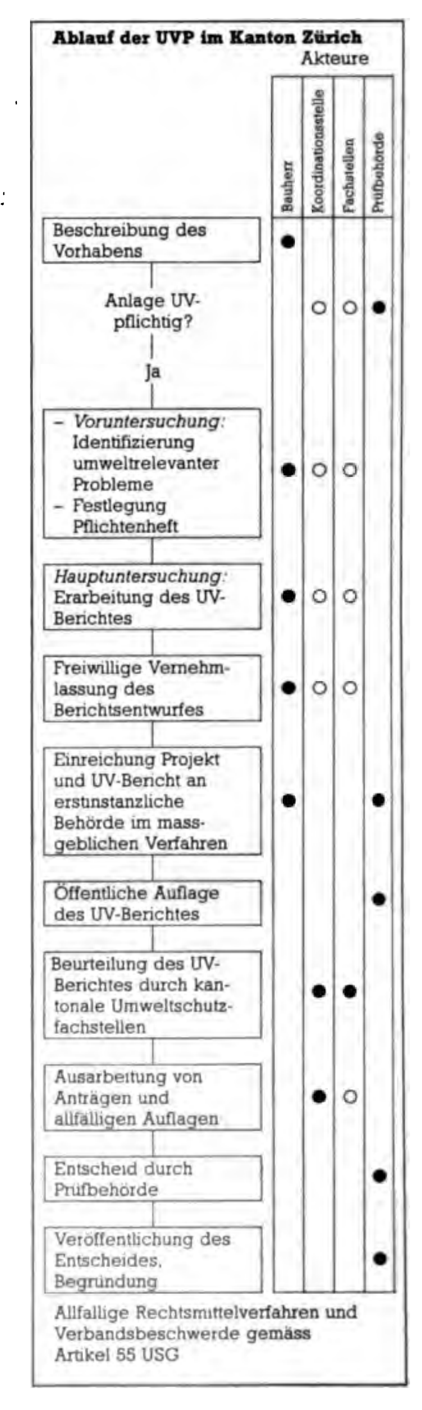
Hans-Peter Margulies und Heinz Trachsler, Zürich

1. Einleitung

Erste praktische Erfahrungen mit der Abwicklung von Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) im Sinne von Art. 9 des Bundesgesetzes über den Umweltschutz (USG) sammelt die kantonal-zürcherische Verwaltung seit dem Frühling 1986. Auf Beschwerde der Schweizerischen Gesellschaft für Umweltschutz und des Heimatschutzes hob das Zürcherische Verwaltungsgericht am 28. Februar 1986 die Bewilligung auf, mit der die Bausektion II der Stadt Zürich der Limmat-Parking AG grünes Licht für die Erstellung eines Parkhauses mit 940 Einstellplätzen erteilt hatte[1]. Das Gericht anerkannte mit seinem Entscheid die Legitimation der Umweltschutzorganisationen zur Verbandsbeschwerde gemäss Umweltschutzgesetz (USG) Art. 55 und stellte klar, dass das Gesetz und damit die Bestimmung von Art. 9 über die UVP von der in erster Instanz entscheidenden Behörde anzuwenden sei. Obschon zahlreiche Verfahrensfragen erst aufgrund der künftigen Verordnung des Bundesrates über die UVP beantwortet werden können und kantonale Anschlussregelungen bis heute noch fehlen, war damit allen Projektanten und entscheidenden Instanzen im Kanton Zürich ein klarer Auftrag erteilt: UVP sind durchzuführen! Als Richtlinie für den Entscheid über die Unterstellung eines Vorhabens unter eine UVP dient dabei die im Anhang zu den bisherigen Verordnungsentwürfen (E-UVPV)[2] enthaltene Liste über UVP-Anlagen und massgebliche Verfahren.

2. Ablauf der UVP im Kanton Zürich

Das Bild vermittelt einen schematischen Überblick über den Ablauf der UVP im Kanton Zürich. Wesentlich ist vorerst, dass die Prüfung kein eigenes, neues Bewilligungsverfahren erfordert. Sie gliedert sich vielmehr in bereits bestehende Verfahren – sogenannte massgebliche Verfahren (z. B. Baubewilligungsverfahren, Plangenehmigungsverfahren, verschiedene Konzessionsverfahren) ein. Im Rahmen eines derartigen Verfahrens reicht der Gesuchsteller der Behörde zusammen mit den Gesuchsunterlagen einen gesonderten «Bericht über die Auswirkungen der Anlage auf die Umwelt» (vgl. Art. 7 und 11 UVPV)[3] ein.



Die Begutachtung von Pflichtenheften für die Erarbeitung von solchen Umweltverträglichkeits-Berichten (UV-Bericht), die Beurteilung der Berichte selbst und die Formulierung von Anträgen an die entscheidenden Behörden erfordern auf seiten der Fachstellen der kantonalen Umweltschutz-Verwaltung eine enge Zusammenarbeit. In diese Kooperation ist auch der Verfasser des UV-Berichtes miteinzubeziehen. Die Koordinationsstelle für Umweltschutz fungiert in diesem Prozess:

- als Anlaufstelle für erste Fragen der UVP-Pflichtigkeit eines Vorhabens.
- Sie berät den Bauherrn resp. den Verfasser des UV-Berichtes bei der Erstellung des Pflichtenheftes.
- Sie begutachtet zusammen mit den betroffenen Fachstellen Pflichtenhefte für die Erstellung von UV-Berichten.
- Sie nimmt eine erste ganzheitliche Prüfung des Umweltverträglichkeitsberichtes vor (Vollständigkeit, Transparenz, Nachvollziehbarkeit usw.).
- Sie wirkt als Drehscheibe für das Mitberichtsverfahren, in dem die Umweltverträglichkeitsberichte von den Fachstellen begutachtet werden.
- Sie verfasst aufgrund der Ergebnisse des Mitberichtsverfahrens die Gesamtbeurteilung und die Antragstellungen an die entscheidenden Behörden von Kanton und Gemeinden.
- Bei gegenläufigen Einzelanträgen versucht sie eine Einigung der Fachstellenanträge zu erreichen oder kann der entscheidenden Behörde Vorschläge zur Konfliktlösung und eigene Anträge unterbreiten.
- Gemäss Art. 13 UVPV hat sie ferner zusammen mit den Umweltschutz-Fachstellen zu beurteilen, ob die geplante Anlage den Vorschriften über den Umweltschutz entspricht, obschon diese Prüfung ja auch Sache der entscheidenden Behörde sein muss.
- Sie begutachtet zusammen mit den betroffenen Fachstellen Pflichtenhefte für die Erstellung von UV-Berichten.
- Sie nimmt eine erste ganzheitliche Prüfung des Umweltverträglichkeitsberichtes vor (Vollständigkeit, Transparenz, Nachvollziehbarkeit usw.).
- Sie wirkt als Drehscheibe für das Mitberichtsverfahren, in dem die Umweltverträglichkeitsberichte von den Fachstellen begutachtet werden.
- Sie verfasst aufgrund der Ergebnisse des Mitberichtsverfahrens die Gesamtbeurteilung und die Antragstellungen an die entscheidenden Behörden von Kanton und Gemeinden.
- Bei gegenläufigen Einzelanträgen versucht sie eine Einigung der Fachstellenanträge zu erreichen oder kann der entscheidenden Behörde Vorschläge zur Konfliktlösung und eigene Anträge unterbreiten.
- Gemäss Art. 13 UVPV hat sie ferner zusammen mit den Umweltschutz-Fachstellen zu beurteilen, ob die geplante Anlage den Vorschriften über den Umweltschutz entspricht, obschon diese Prüfung ja auch Sache der entscheidenden Behörde sein muss.

3. Anforderungen an den UV-Bericht

Die Qualität eines UV-Berichtes spielt eine entscheidende Rolle. Nur ein übersichtlicher, klar verständlicher und gut dokumentierter Bericht ermöglicht eine speditive Durchführung des Beurteilungs- und Prüfverfahrens bei den kantonalen Fachstellen. Fehlerhafte und lückenhafte Berichte führen automatisch zu einer Verzögerung des Verfahrens. Bevor auf erste Erfahrungen eingegangen wird, seien daher kurz die wichtigsten Anforderungen an einen UV-Bericht dargestellt:

---

[1] Vereinigung für Umweltrecht (Hrsg.), 1986: Umweltrecht in der Praxis, Sept. 1986, S. 10ff.

[2] Eidg. Departement des Innern: Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (Entwurf), Mai 1986. (Im weiteren liegt eine überarbeitete, allerdings unveröffentlichte Fassung vom März 1988 vor.)

[3] Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV) vom 19. Oktober 1988 (Inkrafttreten: 1. Januar 1989).

Der Bericht hat diejenigen Angaben zu enthalten, welche die zuständige Behörde benötigt, um das Projekt auf seine Übereinstimmung mit den Bestimmungen des Umweltschutzgesetzes und den weiteren Vorschriften über den Schutz der Umwelt (Natur- und Heimatschutz, Gewässerschutz, Walderhaltung, Fischerei usw.) zu prüfen. Er muss dazu insbesondere die mit der geplanten Anlage direkt oder indirekt verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt sowohl einzeln als auch gesamthaft und in ihrem Zusammenwirken ermitteln und bewerten.

Laut Art. 9 Abs. 2 USG hat er dabei über die folgenden Punkte zu informieren:

a) den Ausgangszustand

b) das Vorhaben, einschliesslich der vorgesehenen Massnahmen zum Schutze der Umwelt und für den Katastrophenfall

c) die voraussichtlich verbleibende Belastung der Umwelt

d) die Massnahmen, die eine weitere Verminderung der Umweltbelastung ermöglichen, sowie die Kosten dafür.

Der Umweltverträglichkeitsbericht ist das zentrale Kommunikationsmittel zwischen allen an der UVP beteiligten Akteuren. Er hat dazu – neben den inhaltlichen – auch bestimmte formale Anforderungen zu erfüllen.

Loretan[4] umschreibt diese Anforderungen wie folgt: «Der UV-Bericht erfüllt die Funktion eines Serviertabletts, auf dem die Untersuchungsergebnisse und Expertenberichte entscheidungsgerecht darzubieten sind. Er muss daher einen Mittelweg zwischen wissenschaftlicher Überzeugungskraft und Verständlichkeit für den wissenschaftlich ungeschulten Leser finden. Dem letzteren müssen die Umweltauswirkungen eines Vorhabens unmissverständlich einsichtig gemacht werden. Art. 9 USG verlangt vom Gesuchsteller, dass er sich selbst, den Behörden und der Öffentlichkeit über die Umweltverträglichkeit seines Vorhabens Rechenschaft gibt. Diese Verpflichtung erfüllt er nur durch eine verständliche, lesbare Darstellung der Untersuchungen. Diese alleine nützen nichts, wenn sie wegen ungenügender Präsentation unverwertet bleiben.»

Um diesen Forderungen gerecht zu werden, empfiehlt das im Entwurf vorliegende Handbuch UVP[5] des Bundesamtes für Umweltschutz daher einen dreiteiligen Aufbau des UV-Berichtes:

- Nichttechnische, auch für den Laien verständliche Zusammenfassung
- technischer Hauptbericht, welcher die gem. Art. 9 USG verlangten Angaben in verständlicher Form darstellt.
- Anhänge, welche in einer dem Spezialisten verständlichen und überprüfbaren Weise die Ausführungen des Hauptteils belegen und auch die Quellenangaben für die benötigten Daten enthalten.

4. Erste Erfahrungen mit der UVP in der zürcherischen kantonalen Verwaltung

4.1 Positive Erfahrungen

Der Erfolg der UVP darf sicherlich nicht an der Zahl der verhinderten Projekte gemessen werden. Entscheidender ist vielmehr, ob die UVP auch tatsächlich dazu führt, dass umweltfreundlichere, «umweltverträgliche» Projekte realisiert werden.

Dazu drei (bescheidene) Beispiele:

- Eine Gemeinde verweigert die Baubewilligung für ein Einkaufszentrum mit 500–700 Parkplätzen u.a. aus lufthygienischer Sicht, weil diese infolge der mehrmaligen Belegung pro Tag ein sehr hohes Verkehrsaufkommen auslösen würden. Das Projekt liegt in einem lufthygienischen Sanierungsgebiet mit einer gegenwärtigen NO_2-Belastung in der Grössenordnung von 50 $\mu g/m^3$.

---

[4] Loretan, Th., 1986: Die Umweltverträglichkeitsprüfung – Ihre Ausgestaltung im Bundesgesetz über den Umweltschutz, mit Hinweisen auf das amerikanische und deutsche Recht. Zürcher Studien zum öffentlichen Recht, Bd. 64, 186 S.

[5] Bundesamt für Umweltschutz, 1984: Handbuch UVP (Entwurf), S. 35f.

- Bei einer Bachkorrektur kritisiert die kantonale Fachstelle Naturschutz das Vorhaben und verlangt Verbesserungsvorschläge in Richtung eines naturnahen Wasserbaus. Es erfolgt eine Überarbeitung des Projektes und eine Ergänzung durch einen landschaftspflegerischen Begleitplan.
- Bei einem Geschäftshaus mit 760 Parkplätzen enthält der UV-Bericht nur ungenügende Aussagen über die Luftschadstoffbelastung und muss vorerst zur Überarbeitung zurückgewiesen werden. Aufgrund der lufthygienischen Situation werden die Parkplätze auf 600 reduziert (was allerdings immer noch zu viel ist). Die Gemeinde erlässt Auflagen bezüglich der Durchführung der Transporte des Aushubmaterials mit der Bahn. Sie ergreift zudem zum Schutze bestehender Wohngebiete flankierende Massnahmen im Bereich der Verkehrserschliessung.

Dies sind mindestens erste Teilerfolge. Die Notwendigkeit, einen Umweltverträglichkeits-Bericht zu erstellen und die nachfolgende Beurteilung durch die Umweltschutzfachstellen führen dazu, dass in Zukunft seriöser und umweltbewusster projektiert wird. Das gilt sowohl für private Bauherren als auch für die öffentliche Hand.

Folgende Gründe sprechen dafür:
- Der UV-Bericht zwingt zu einer Gesamtschau und Offenlegung der Umweltauswirkungen. Umweltschutzmassnahmen und Projektverbesserungen müssen aufgezeigt werden.
- Der UV-Bericht und die Ergebnisse der UVP müssen öffentlich aufgelegt werden (USG Art. 9, Abs. 8; UVPV Art. 15 und 20). Im weiteren besteht die Möglichkeit einer Verbandsbeschwerde (USG Art. 55). Es entsteht damit eine Art «Glashaus-Effekt» vor allem für öffentliche Vorhaben.

4.2 Negative Erfahrungen

Eine Analyse der bis jetzt bei der Koordinationsstelle für Umweltschutz eingereichten UV-Berichte zeigt, dass diese mehrheitlich noch nicht den in Abschnitt 3 geschilderten Anforderungen entsprechen. Einzelne Berichte mussten zur Ergänzung oder zur vollständigen Überarbeitung zurückgewiesen werden. Folgende Kritikpunkte sind zu nennen:
- Die Berichte sind oft nicht entsprechend den Vorgaben von USG Art. 9, Abs. 2 aufgebaut und entsprechen z. T. auch nicht den im Handbuch UVP enthaltenen Empfehlungen.
- Sie verfügen z. T. über inhaltliche Lücken (z. B. fehlen Angaben über Massnahmen zur weiteren Verminderung der Umweltbelastungen)
- Es treten methodische Fehler auf bei der Abgrenzung des Untersuchungsrahmens (zeitlich, sachlich, räumlich). Insbesondere bei Parkhäusern gibt die Abgrenzung des in die Untersuchung einzubeziehenden Perimeters immer wieder zu Diskussionen Anlass.
- Im Rahmen einer UVP sind Prognosen über die voraussichtlichen Umweltauswirkungen eines Projektes durchzuführen. Prognosen sind immer mit Unsicherheiten behaftet. Das Handbuch UVP[6] verlangt daher, dass mit der Präsentation der getroffenen Annahmen und der Resultate dargestellt wird,
  - welches die Genauigkeit der getroffenen Annahmen ist und in welchen Bereichen sie streuen.
  - wie stark (sensitiv) die Ergebnisse auf die wichtigsten Unsicherheiten in den Annahmen reagieren.
  - wie zuverlässig demnach die wichtigsten Resultate und Schlussfolgerungen sind.

  Derartige Sensitivitätsanalysen fehlen bis jetzt in praktisch allen Berichten!
- Die Berichte weisen z. T. eine zu geringe Bearbeitungstiefe auf und enthalten nur oberflächliche Aussagen.
- Sehr oft mangelt es an Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit (vgl. Abschnitt 3), insbesondere fehlen Quellenangaben für die getroffenen Grundannahmen. Die im Bericht enthaltenen Aussagen sind damit auch für den beurteilenden Experten nicht oder nur müh-

[6] Bundesamt für Umweltschutz, a.a.O.: S. 31.

sam überprüfbar. Die Beurteilung und Prüfung des Berichtes wird zur mühseligen «Detekti arbeit», das Verfahren zieht sich entsprechend in die Länge.

Wo liegen die Gründe für diese noch unbefriedigende Situation?

Viele Berichte sind nach Inkraftsetzung des USG erst in einer späten Phase der Projektierung a die Hand genommen worden. Es wurde z.T. nicht oder zu spät Kontakt aufgenommen mit de Fachstellen, und es wurden keine Pflichtenheftdiskussionen geführt. Insgesamt ist zu hoffen, das es sich dabei lediglich um Anfangsschwierigkeiten handelt, die relativ rasch verschwinden we den und dass nicht ein bewusster Minimalismus dahintersteckt. Die öffentliche Auflage de Berichte wird sicherlich auch eine gewisse «erzieherische» Wirkung auf die Qualität der Bericht haben. Ein Bauherr, dessen Projekt infolge eines mangelhaften UV-Berichtes Verzögerunge erfahren hat, wird sich beim nächsten Vorhaben bei der Wahl des UV-Berichterstellers entspr chend absichern und einen Gutachter wählen, welcher Gewähr für einen einwandfreien Berich bietet.

4.3 Verbesserungsvorschläge

Folgendes ist im einzelnen noch besser zu machen:

- An einem UV-Bericht sollte man zu arbeiten beginnen, sobald man an die Planung oder Pr jektierung eines Vorhabens geht. Zu oft werden heute noch Berichte erstellt, nachdem die Pr jektierung im wesentlichen bereits abgeschlossen ist. Wen wundert's, wenn dann im Berich beschönigende Darstellungen des Vorhabens versucht werden. In solchen Fällen sind dan auch selten ausreichende Angaben zur verbleibenden Restbelastung und zu den Massnahme zu finden, mit denen sie weiter reduziert werden könnten (USG Art. 9 Abs. 2, lit. d). Ganz ve mieden wird in diesem Moment auch die Beantwortung der Frage, ob nicht eine andere al die projektierte Variante die grundsätzlich bessere gewesen wäre.
- Eine UVP im massgeblichen Verfahren ist nur sinnvoll und nützlich, wenn im Bericht ein Vo habensbeschrieb so angelegt wird, dass die Problemstellungen deutlich und bewertbar ersich lich sind. Es ist zum Beispiel müssig, Gedanken darüber anzustellen, ob und wieweit ein Reduktion der Parkplatzzahlen einer Überbauung zu verfügen ist, wenn man nicht einma weiss, welche Nutzungen im beantragten Neubau realisiert werden sollen. Mag es bisher noc vertretbar gewesen sein, beim Entscheid über ein solches Vorhaben eine nachmalige Prüfun eines sog. «Nebenpunktes» vorzubehalten, mit dem Zweck der bundesrechtlichen Bestim mungen über die UVP verträgt sich das nicht. Ist das massgebliche Verfahren das Baubewill gungsverfahren, so hat der UV-Bericht u. E. schon im Zeitpunkt, in dem er eingereicht wir detaillierte Angaben über die geplante Nutzung zu enthalten. Genügend sind diese Angabe nur dann, wenn sie die Behörden instand setzen, sich ein genaues Bild der Umweltbelastu gen zu machen und ihr den Entscheid darüber ermöglichen, welches Umweltschutzrecht wi anzuwenden ist.
- Soll die Erarbeitung von Pflichtenheften für UV-Berichte und auch das Mitberichtsverfahre nach Einreichung der Berichte speditiv ablaufen, so müssen sowohl die Umweltschutz-Ve waltung wie auch die eingesetzten Spezialistenteams von Anfang an sehr eng zusammenarbe ten. Der ersten Phase der Arbeit an einem UV-Bericht, der Festlegung des Pflichtenhefte kommt dabei besondere Bedeutung zu. Die bisherige Praxis zeigt, dass die Diskussion zw schen Berichtverfasser und Umweltschutz-Fachstellen zu guten Resultaten führt, wenn de Verfasser angeben kann, welche Probleme im Zusammenhang mit dem Projekt relevant sin (Darstellung in einer sog. Relevanzmatrix). Ferner ist anzugeben, welche Daten und Beurte lungsmethoden er verwenden will. Noch ergiebiger wird die Diskussion eines Pflichtenhefte wenn bereits die Resultate einer ersten Voruntersuchung vorliegen.

5. Offene Fragen

Nicht nur bei der Erstellung der UV-Berichte treten Probleme auf, auch seitens der Verwaltung stellen sich bei der Abwicklung der UVP verschiedene Verfahrensfragen:

- massgebliches Verfahren:
  Der UV-Bericht hat eine ganzheitliche Behandlung aller Umweltaspekte eines Vorhabens zum Gegenstand. Die UVP wird in einem sog. «massgeblichen Verfahren» (vgl. Abschnitt 2) abgewickelt. Dabei entsteht das Problem, dass die Prüfbehörde, welche in diesem massgeblichen Verfahren über das Vorhaben entscheidet, meistens nur für einen Teil der notwendigen Bewilligungen zuständig ist. Es stellt sich dabei die Frage, wer letztendlich die für ein Projekt notwendigen Auflagen zeitlich und sachlich richtig koordiniert. Es wird zu prüfen sein, wieweit die in der UVPV Art. 21 enthaltenen Regelungen unverändert für den Kanton übernommen werden können.
- Rollenverteilung zwischen Kanton und Gemeinde:
  Offene Fragen stellen sich auch in all jenen Fällen, in denen das Baubewilligungsverfahren als massgebliches Verfahren bezeichnet werden kann. Zuständige Prüfbehörde im Kanton Zürich ist in diesem Fall die kommunale Baubehörde. Es stellt sich dabei die Frage, wer nach Einreichung von Baugesuch und UV-Bericht die Beurteilung des UV-Berichtes vornimmt. Die Gemeinden verfügen in den seltensten Fällen über die notwendigen Spezialisten, um diese Aufgabe übernehmen zu können. Wird die zukünftige kantonale Regelung aus diesem Grund vorsehen, dass die Umweltschutz-Fachstellen des Kantons die Beurteilung der UV-Berichte auch dort vorzunehmen haben, wo diese im Baubewilligungsverfahren bei den Gemeinden eingereicht werden, entzieht man den kommunalen Entscheidbehörden de facto einen Grossteil der Verantwortung, den sie für einen möglichst umweltgerechten Bauentscheid eigentlich zu tragen hätten. Weniger problematisch ist die Aufgabenteilung zwischen dem Kanton und grösseren Städten, wie Zürich und Winterthur, die selbst über bestausgewiesene Fachstellen verfügen, so dass eine Delegation des gesamten UVP-Vorganges durch den Kanton bedenkenlos erfolgen kann. Eine entsprechende Praxis hat sich denn auch bereits eingespielt.

Abschliessend sei noch auf ein ungelöstes Problem von grundsätzlicher Bedeutung hingewiesen, das sich wohl auch gestützt auf USG Art. 9 und die Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung nicht lösen lässt: Mit einer Projekt-UVP, und um eine solche handelt es sich bei Fällen gemäss USG Art. 9, können Mängel der vorgehenden Planungen nicht behoben werden. Sehr häufig sind zur Zeit Verfahren, in denen über die Zulässigkeit von Einkaufszentren oder Bürogebäuden zu entscheiden ist, welche in Zonen realisiert werden, die früher für industrielle Produktionsstätten reserviert waren. Zudem sind die neuen Nutzungen nach geltendem kantonalen und kommunalen Baurecht oft erst zulässig, wenn eine ausreichende Erschliessung durch die Erstellung einer genügenden Anzahl von Parkplätzen garantiert wird (Pflichtparkplätze gem. Planungs- und Baugesetz § 243). Das führt zu enormen Kumulationen von Parkplätzen und Verkehrsbewegungen und induziert entsprechende Zunahmen der Immissionen in der Umgebung der Anlage bis hin zu weit entfernten Wohngebieten entlang der Zufahrtswege.

Der UV-Bericht hat das Ausmass dieser zusätzlichen Immissionen darzustellen. Er hat zudem auch Vorschläge zu machen für Massnahmen, die eine weitere Verminderung der Umweltbelastung ermöglichen (USG Art. 9, Abs. 2, lit. d). Diese Massnahmen können wohl zu gewissen Optimierungen am Projekt führen (z. B. Reduktion der Parkplätze), sie ermöglichen jedoch meistens keine grundsätzliche Lösung des Problems. Zudem ist es oft so, dass die von dieser projektierten Einzelanlage ausgehenden Emissionen die gesetzlichen Grenzwerte nicht überschreiten. Das Nebeneinander verschiedener derartiger «umweltverträglicher» Projekte führt jedoch zu unerwünschten Belastungen, welche z. B. im Widerspruch zur laufenden Massnahmenplanung Luft stehen. Hier zeigen sich klar die Grenzen der schweizerischen UVP: Es handelt sich um ein projektbezogenes Instrument des defensiven, reagierenden Umweltschutzes, sie bildet keinen Ersatz für eine Umwelt-Vorsorgeplanung! Im geschilderten Beispiel hilft jedoch eine einzelfallweise Beurteilung des Projektes kaum weiter, hier wäre eine kommunale oder regionale Lösung des Problems unter Berücksichtigung der Gesamtbelastung notwendig. Es ist also eindeutig verfehlt,

anzunehmen, mit der UVP könnten auch vorangegangene – aus der Sicht des Umweltschutzes – unzweckmässige Nutzungszuweisungen der Planung korrigiert werden.

Es wäre daher dringend notwendig, dass die projektbezogene UVP gemäss USG ergänzt wird, durch eine querschnittsorientierte ökologische Planung[7], welche unter Berücksichtigung der bereits bestehenden Belastungssituation umweltgerechte Lösungsvorschläge erarbeitet. Sowohl die Richt- als auch die Nutzungsplanung sollten in Zukunft vermehrt unter Beachtung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt konzipiert, beschlossen und vor der Genehmigung eingehend auf ihre umweltbezogene Zweckmässigkeit geprüft werden[8].

Hans-Peter Margulies, Dr. Heinz Trachsler, Koordinationsstelle für Umweltschutz, Baudirektion des Kantons Zürich, 8090 Zürich

---

[7] Vgl. dazu: Schmid, W. A.; Schilter, R. Ch.; Trachsler, H., 1987: Umweltschutz und Raumplanung in der Schweiz. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Beiträge, Bd. 97, Hannover, S. 36ff.

[8] Vgl. dazu: Steiger, M., 1988: Umweltschutz und Raumplanung – Ersetzt die Zweckmässigkeitsprüfung eines Raumplanungsentscheides die UVP? Schweiz. Ing. u. Arch., Nr. 12, S. 338–343.

Buchbesprechungen

Reimar Lüst et al. (Hrsg.): Beobachtung, Experiment und Theorie in Naturwissenschaft und Medizin. Verhandlungen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. Stuttgart, 1987, 484 Seiten. Preis 38 DM.

Unter diesem Motto stand die 114. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, die im September 1986 in München stattfand. In einer lesenswerten, fast 500 Druckseiten umfassenden Monographie sind sowohl die sechs einführenden Ansprachen als auch die 25 Fachvorträge im vollen Wortlaut wiedergegeben. Ein rund 40seitiger Schlussteil enthält Berichte und Mitteilungen für die Mitglieder der Gesellschaft.

In den Eröffnungsansprachen wird das Tagungsthema weniger vom erkenntnistheoretischen als vom gesellschaftlich-politischen Standpunkt aus beleuchtet. So betont E. v. Kuenheim (BMW, München) die Wichtigkeit einer breiten Wissensbasis – insbesondere für den Ingenieur. Bundesminister Heinz Riesenhuber unterstreicht die Notwendigkeit ganzheitlicher Erfassung aller menschlichen Bedürfnisse, was nur interdisziplinär erreichbar sei. Grenzen sind der Forschung dort gesetzt, wo sie Menschenwürde tangiert. Ralf Dahrendorf wünscht sich «klare Verhältnisse» und bedauert, dass mit der innert 30 Jahren erfolgten Verzehnfachung der Professorenzahl in Deutschland oftmals «wissenschaftliche Impotenz durch hochtrabendes Gerede kompensiert wird». Politik und Wissenschaft unterscheiden sich in der Art des Argumentierens und eine Vermengung schadet beiden. Zudem hat ehrliche, unabhängige wissenschaftliche Forschung ihre eigene Zeitperspektive. Die Dichte der Lebewesen auf der Erde und der sprunghafte Vorstoss unseres Wissens in neue Dimensionen sind für K. Pinkau unsere zentralen Probleme. Aufgabe der Wissenschaft ist die Suche nach Wahrheit. Dazu benötigt die Forschung einen gewissen Freiraum, aber sie verliert ihre Unschuld mit ihren «Anwendungen». Das Verständnis für den Prozess wissenschaftlicher Wahrheitsfindung gelte es in der Öffentlichkeit zu fördern, denn Wissenschaft sei heute unverzichtbar geworden.

Mit seinem einführenden Vortrag möchte Reimar Lüst am Beispiel der Kometenforschung zeigen, wie wissenschaftliche Erkenntnis gewonnen wird. Seit dem Vorbeiflug der Giotto-Raumsonde am Halleyschen Kometen wissen wir jetzt, dass dessen Kern ein etwa 10 km grosser «schmutziger Schneeball» ist. Nun zu den eigentlichen Fachvorträgen! Über den Forschungsbereich Physik/Astronomie orientieren die folgenden Beiträge: Nobelpreisträger R. Mössbauer befasst sich mit dem Problem der Neutrino-Ruhmasse. Die am Kernreaktor Gösgen (Schweiz) während 4 Jahren durchgeführten Messungen konnten die in Bugey (Frankreich) gefundenen Neutrino-Oszillationen nicht bestätigen. Daraus folgt eine engere Toleranz für die Neutrino-Ruhmasse, was für die Kosmologie von Bedeutung ist. H. Schopper gibt ein ausgezeichnetes Resumé der Elementarteilchenphysik und schildert die Bemühungen, alle vier heute bekannten Naturkräfte in einer einheitlichen Theorie zu erfassen. Dabei wird deutlich, dass der Teilchenbegriff, also das Suchen nach invarianten «Substanzen», seine Bedeutung verliert. An dessen Stelle treten Strukturbegriffe, die nun eher den Ideen Platons gleichen.

Aus dem Vortrag von K. Fuchs über Tiefbohrungen in der Erdkruste wird klar, dass zwar bis zu den erreichbaren Bohrtiefen von ca. 14 km (nur 0,2% des Erdradius!) Energie- und Materietransport untersucht werden können, die hauptsächlichen Kenntnisse über das Erdinnere aber nach wie vor aus der «Tomographie» mittels seismischer Wellen stammen. Ein eindrückliches Beispiel für das Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Forschung liefert die von R. Genzel dargestellte Untersuchung des 28 000 Lichtjahre entfernten galaktischen Zentrums. Die minutiöse Analyse der Spektren im ganzen nutzbaren Wellenlängenbereich (um bis Dezimeter) ergibt eine hohe Massenkonzentration ($>10^6$ Sonnenmassen) und eine zirkulare Materiebewegung im Umkreis des galaktischen Zentrums. Ursache ist mit grosser Wahrscheinlichkeit ein «schwarzes Loch».

Drei weitere Vorträge aus dem Bereich der Physik sind vorwiegend anwendungsorientiert und belegen andererseits, dass Quantenmechanik zu einem Alltagswerkzeug geworden ist. F. Koch zeigt dies am Beispiel der Mikroelektronik, wo monoatomare Schichten technisch beherrschbar geworden sind. E. Recknagel

stellt das junge Forschungsgebiet der «Cluster» vor, das sind Materieklümpchen aus weniger als tausend Atomen oder Molekülen. W. Kaiser erklärt, wie mit Lichtblitzen von weniger als 10^{-12} s Dauer elementare Prozesse in biologisch wichtigen Molekülen untersucht werden können.

Einleitend zu den Beiträgen aus Medizin und Biologie beleuchtet E. Buchborn das Spannungsfeld zwischen der viel älteren ärztlichen Erfahrung und wissenschaftlich begründeter Erkenntnis. Die Thematik wird im Vortrag von E. Mutschler über Arzneimittel nochmals aufgegriffen. Drei Vorträge betreffen die Immunologie: Durch die Erfahrungen mit Organtransplantationen lernt man Immunreaktionen spezifisch zu steuern, statt sie global zu unterdrücken (R. Pichlmayr), und aus der Therapie der Multiplen Sklerose ergibt sich, dass auch im Zentralnervensystem Immunreaktionen stattfinden (H. Wekerle). Es ist heute möglich, praktisch für jede dem Immunsystem zugängliche Oberflächenstruktur eines Moleküls monoklonale Antikörper herzustellen (G. Riethmüller). Fragen des Stoffwechsels behandeln die Vorträge von P. C. Weber, der auf die grosse Bedeutung der ungesättigten w3-Fettsäuren für richtige Ernährung hinweist, und von R. Fleckenstein über die therapeutische Bedeutung der zahlreichen bekannten Ca-Antagonisten.

Drei Vorträge sind neueren Erkenntnissen über das Zentralnervensystem gewidmet: Nach C. Scriba und K. v. Werder spielen Hormone auch als Neurotransmitter eine Rolle. W. D. Heiss bespricht die Methoden der Kernspin- und Positronenemissions-Tomographie und ihre Bedeutung für die Hirnforschung. H. H. Hippius geht es um den Begriff das «Biologischen Markers» und seine Anwendung in der Therapie von Psychosen. «Leben unter extremen Bedingungen» wird in vier Vorträgen erörtert: Bakterien, die 3800 m unter dem Meeresspiegel mit thermischer Energie aus heissen Quellen Chemosynthesen vollziehen, bilden die Nahrungsgrundlage reicher Tierpopulationen. Das geht aus Tiefseeforschungen hervor (H. W. Jannasch). Die Hochtemperaturgrenzen des Lebens beschreibt K. Stetter, und E. Simon geht den je nach Körpergrösse variierenden Methoden der Lebewesen nach, um im arktischen Klima zu überleben. Dass sich Pflanzen nicht nur mit chemischen Mitteln gegen das Gefressenwerden wehren, sondern Raum- und Zeitstatistik nutzen, erfährt man im Referat von H. Remmert. Von «Sonderformen des Lebens» handeln die beiden Vorträge von P. Sitte über die Endozytobiose (= Eindringen von Zellen in andere) und von J. St. Schell über die Symbiose von Bakterien und Pflanzen.

Wer sich rasch einen Überblick über die wichtigsten aktuellen Forschungsgebiete verschaffen will, wird diese Monographie mit Gewinn lesen. Man findet auch zahlreiche Hinweise auf Originalarbeiten und weiterführende Literatur. Auffällig ist wohl der durchgängige Fortschrittsoptimismus, und in diesem Licht ist auch die Attacke, welche R. Dahrendorf in seinem Vortrag gegen den Philosophen P. Feyerabend führt, nur konsequent.

R. Rüetschi

Wolfgang Böhme (Hrsg.): Handbuch der Reptilien und Amphibien Europas. Band 2/II, Echsen (Sauria) III. Aula Verlag Wiesbaden, 1986; 434 Seiten, 64 Abb., DM 216.

Über die Intention und den Aufbau des Handbuches zur europäischen Herpetofauna erschien bereits in Heft 2, Jg. 132 (1987) eine Besprechung. Dabei wurden auch die Bände 1 und 2/I vorgestellt. Inzwischen ist der Band 2/II erschienen, der einer einzigen Eidechsengattung gewidmet ist, nämlich *Podarcis* (Mauereidechsen). Die Artengruppe wurde lange Zeit der Gattung *Lacerta* zugerechnet, bis sie 1983 durch Arnold abgetrennt wurde.

Die Mauereidechsen sind in Europa mit 17 Arten vertreten, deren Diagnose selbst dem Herpetologen Mühe bereitet. Lediglich eine davon, *Podarcis muralis*, kommt auch in Mitteleuropa vor. In der Schweiz ist ihr Verbreitungsgebiet hauptsächlich auf die südlichen Alpentäler beschränkt, doch gibt es auch im Mittelland und im Jura eine Reihe bekannter Vorkommen. So wurde bei einer kürzlich durchgeführten Bestandeserhebung der Reptilien im Stadtgebiet von Zürich eine grosse *muralis*-Population auf dem Bahnareal der SBB entdeckt. Offenbar profitieren die Tiere vom milden Mikroklima, das an diesem Standort herrscht. Eine zweite *Podarcis*-Art, die Ruineneidechse *(P. sicula)*, lebt im südlichen Tessin. Die vorhandenen Belegexemplare stammen aus der Gegend von Chiasso.

Im vorliegenden Mauereidechsenband ist das gesamte Wissen über die 17 *Podarcis*-Arten

in kompetenter Weise zusammengefasst. Die Bearbeitung wurde 15 Spezialisten übertragen, die auch bisher nicht publiziertes Material in das Werk einfliessen liessen. Dadurch wird ein umfassendes Bild des aktuellen Wissensstandes vermittelt. In gewohnt gründlicher Weise beschreiben die Autoren Artmerkmale (inkl. Skelett, Blutbild und Karyotyp), Merkmalsvariationen, Verbreitungsgebiet, Unterarten, Ökologie, Jugendentwicklung und Verhalten der Mauereidechsen. Mit den ersten drei Bänden zeichnet sich schon jetzt ab, dass sich das sechsbändige Handbuch zum grundlegenden Nachschlagewerk der Berufs- und Amateurherpetologen etablieren wird. Aus den Abschnitten zur Lebensweise der Tiere können aber auch Naturschützer, Landschaftsplaner und Ökologen wertvolle Informationen herausgreifen. So erfährt man beispielsweise, dass *P. muralis*-Individuen in der Südschweiz Einzelreviere von 15 m^2 Mauerfläche beanspruchen, oder dass 60% der Tiere einer Population stationär sind, während der Rest auf Reviersuche ist. Selbst die Ursachen für den Bestandesrückgang kommen zur Sprache. In diesem Sinn kann das Werk einem Benützerkreis empfohlen werden, der über das Feld der Spezialisten hinausreicht. Hansruedi Wildermuth

Wilfried Probst: Biologie der Moos- und Farnpflanzen. Quelle & Meyer Heidelberg, Wiesbaden. 2. Auflage, 1987. UTB 1418. 333 Seiten, zahlreiche, oft ganzseitige Abb. DM 32.80.

Den Moosen, Farnen, Bärlappen und Schachtelhalmen fehlt die Attraktivität der farbenfrohen Blütenpflanzen. Auch wirtschaftlich sind sie kaum von Bedeutung. Aus diesen Gründen geniessen die höheren Kryptogamen nicht annähernd so viel Popularität wie die Phanerogamen. Eigentlich völlig zu Unrecht, denn bei näherem Hinsehen sind die Moos- und Farnpflanzen sowohl von ihrer Ästhetik wie auch von ihrer Biologie her höchst bemerkenswerte Studienobjekte. Wer sich nicht nur mit der Artenvielfalt, sondern auch mit dem Bau und dem Leben der phylogenetisch ältesten Landpflanzen beschäftigt, stösst zwangsläufig auf Fragen von allgemein biologischer Bedeutung. Dies kommt im vorliegenden Taschenbuchband deutlich zum Ausdruck.

Das Buch ist als Einführung konzipiert und richtet sich an den Anfänger. Die ersten drei Kapitel befassen sich mit der stammesgeschichtlichen Stellung und dem System der beiden Pflanzenabteilungen. Darauf folgen Ausführungen zu Morphologie, Physiologie, Phylogenie, Fortpflanzungsbiologie und Ökologie. Der Anhang enthält eine Liste aller in der BRD geschützten Moos- und Farnpflanzen sowie ein Verzeichnis der gefährdeten Arten (Rote Listen). Den Abschluss bildet eine ausführliche, nach Themen geordnete Literaturzusammenstellung.

Zwei Eigenschaften des Bandes müssen besonders hervorgehoben werden: Erstens enthalten die meisten Kapitel neben theoretischen Abhandlungen Hinweise und Anleitungen zu praktischen Untersuchungen. Lehrer an Hoch- und Mittelschulen, die entsprechende Praktika durchführen, finden hier wertvolle Anregungen, auch für Arbeiten im Freiland. Zweitens ist der didaktisch gut gegliederte Text mit zahlreichen informativen Strichzeichnungen illustriert, die schon beim ersten Durchblättern des Buches angenehm auffallen. Es kann Botanikstudenten, Biologielehrern und Liebhaberbotanikern gleichermassen empfohlen werden.

Hansruedi Wildermuth

Brigitte Tanner, Hans-Konrad Schmutz, Armin Geus: Johann Rudolf Schellenberg. Der Künstler und die naturwissenschaftliche Illustration im 18. Jahrhundert. Neujahrsblatt der Stadtbibliothek Winterthur, Band 318, 1988, Preis Fr. 35.

Drei Viertel des Bandes entfallen auf die Arbeit der Kunsthistorikerin Brigitte Tanner: «Johann Rudolf Schellenberg und die schweizerische Buchillustration im Zeitalter der Aufklärung». Es ist ihre Dissertation an der Philosophischen Fakultät I der Ludwig-Maximilian-Universität München. «Johann Rudolf Schellenberg und sein naturwissenschaftliches Umfeld» heisst der Beitrag von Hans-Konrad Schmutz, Konservator der Naturwissenschaftlichen Sammlungen der Stadt Winterthur. Mit dem Aufsatz «Die entomologischen Illustrationen Johann Rudolf Schellenbergs» rundet Armin Geus, Professor für Geschichte der Biologie an der Universität Marburg, den Band ab.

Johann Rudolf Schellenberg wurde 1740 in Basel geboren als Sohn des Malers und Kupferstechers Johann Ulrich Schellenberg und der Anna Katharina geb. Huber, Tochter des

Basler Malers und Kunstsammlers Johann Rudolf Huber. Von 1748 an wohnte die Familie in der Heimatstadt der Schellenberg, in Winterthur, welche Johann Rudolf bis zu seinem Tode im Jahre 1806 jeweils nur für kurze Zeit verliess. Er beherrschte das Handwerk des Kupferstechers souverän und wurde ein gesuchter Buchillustrator, der z. B. auch für Johann Kaspar Lavater arbeitete. Schon als Zwölfjähriger malte er die ersten Insektenbilder für den Zürcher Arzt und Naturforscher Johannes Gessner. Den beiden Winterthurer Gelehrten, dem Arzt und Entomologen Johann Heinrich Sulzer und dem Naturforscher Joseph Philippe de Clairville, schuf er Tafeln zu deren entomologischen und botanischen Werken. Mit dem Zürcher Entomologen Johann Kaspar Fuessly stand er in freundschaftlicher Verbindung. Um 1800 veröffentlichte Schellenberg selber zwei entomologische Arbeiten über Wanzen und über Fliegen.

Schellenberg kannte die Werke von Maria Sybilla Merian und von A. J. Roesel von Rosenhof. Ihm ging es aber weniger um dekorative Schönheit als um lebendige und analytisch genaue Darstellung. In diesem Sinn darf er als einer der besten Insektendarsteller seiner Zeit genannt werden.

Das Buch gibt auch interessante Einblicke in das Verlagswesen jener Zeit, in die Arbeit des Kupferstechers, in die damaligen Probleme der Insektensystematik und des Insektensammelns. Ganz besonders ist die vorzügliche Illustration hervorzuheben; einem knappen Hundert Schwarz-Weiss-Abbildungen stehen fünfunddreissig prachtvolle farbige Wiedergaben gegenüber.

Kurt Madliger

R. Keller: Immunologie und Immunpathologie, 408 Seiten, 67 Abbildungen, 35 Tabellen, 3. Aufl. Thieme Verlag Stuttgart, 1987, DM 33.–.

Das flexible Taschenbuch liegt, zehn Jahre nach seinem ersten Erscheinen, bereits in 3. Auflage vor. Allein schon dieser äussere Erfolg zeigt, dass der Autor Robert Keller mit dem Wagnis, allein ein Buch über ein so grosses modernes Gebiet wie die Immunologie zu schreiben, Erfolg gehabt hat. Es ist erstaunlich, wie es ihm in allen verschiedenartigen Kapiteln gelingt, sehr komplexe und nicht selten widersprüchliche Befunde zu einem übersichtlichen und einprägsamen Bild zusammenzufügen. Gegenüber der letzten Auflage waren als Folge der raschen wissenschaftlichen Entwicklungen in der Immunologie erhebliche Umarbeitungen notwendig. Zudem ist der klinische Anteil erweitert worden, so dass er jetzt gut die Hälfte des Buches umfasst: dazu gehören immunologische Defektzustände, maligne Neoplasien des lympho-retikulären Systems, Überempfindlichkeitsreaktionen, Immunität gegenüber Infektionen, die Grundlagen der Organtransplantation, Autoimmunkrankheiten und immunologische Prozesse bei Tumoren, sowie ein Anhang über Schutzimpfungen. In einem Glossar sind auf 10 Seiten die notwendigen Fachausdrücke definiert, und die am häufigsten vorkommenden Abkürzungen sind auf den Innenseiten des Umschlages zusammengefasst, so dass der Leser immer sofort nachschlagen kann. Mit Hilfe des ausführlichen Sachverzeichnisses findet er leicht die Textstellen, die zudem als ausführlich (in Fettdruck) bzw. als kurzes Zitat gekennzeichnet sind. Zahlreiche Tabellen und schematische Abbildungen erleichtern die Übersicht. Kurze Zusammenfassungen am Schluss eines jeden Kapitels sind drucktechnisch hervorgehoben.

Der Kreis der Interessenten kann wohl sehr weit gezogen werden: Mediziner in praktisch allen Ausbildungsstadien, vor allem auch Ärzte, die sich über die Entwicklungen auf diesem neuen Fachgebiet orientieren wollen, ferner Biologen der verschiedensten Fachrichtungen werden mit Gewinn das sehr preiswerte Buch studieren, bzw. darin nachschlagen.

W. Hitzig

Hinweise für Autoren

1 **Manuskript**

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle ...).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild ...) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 134 Heft 1 März 1989

Inhalt

Beiträge

Berichte und Notizen

Buchbesprechungen

Preis: Fr. 21.–

Heft 2
Jahrgang 134
Juni 1989

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

OF Orell Füssli Zeitschriften
Graphische Betriebe AG

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Für die Anmeldung neuer Mitglieder stellt das Sekretariat der Naturforschenden Gesellschaft (Frau Elisabeth Rufener, Baltenswilerstrasse 28, 8303 Bassersdorf) Formulare zur Verfügung. Jahresbeitrag für Einzelmitglieder Fr. 50.–, für ausserordentliche Mitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 75.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich).* – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2400; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042–5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134/2*: 85–108

Das antarktische Ozonloch – eine Folge der Luftverschmutzung

Hans U. Dütsch, ETH Zürich

Ausgehend vom einfachen Chapman-Ansatz wird die moderne photochemische Theorie dargestellt, in welcher der Ozonabbau wesentlich durch katalytische Kreisprozesse mit reaktiven Radikalen erfolgt. Es wird gezeigt, dass die beobachtete Ozonverteilung nur durch eine enge Verknüpfung von sehr komplexen chemischen mit ebenfalls komplizierten Transportprozessen verstanden werden kann.

Das sogenannte Ozonloch, das sich im antarktischen Frühjahr seit Ende der 70er Jahre entwickelt hat, wird durch vom Menschen in die Atmosphäre gebrachtes zusätzliches Chlor bei sehr tiefen Temperaturen verursacht. In einer annähernd den ganzen antarktischen Kontinent überdeckenden Luftmasse, die nach aussen durch die dynamischen Verhältnisse über mehrere Monate fast völlig isoliert ist, wird das Chlor vorwiegend durch heterogene Reaktionen aktiviert und baut nach Rückkehr der Sonne das Ozon in der unteren Stratosphäre rasch ab, und zwar durch kompliziertere katalytische Zyklen als sie die normale Theorie kennt. Dabei besteht eine enge Beziehung (Rückkoppelungen) zwischen Chemie und Zirkulation.

The Antarctic ozone hole – an anthropogenic feature

The very complex modern photochemical theorie of atmospheric ozone is described in which odd oxygen destruction is predominantly produced by catalytic cycles with reactive radicals. It is demonstrated that the observed ozone distribution can only be understood on the basis of a tight coupling between similarly complicated chemical and transport processes.

The ozone hole which developed in the Antarctic spring since the late seventies is produced by anthropogenic chlorine which is activated in the extremely cold air at the end of the polar night in the lower stratosphere predominantly by heterogeneous reactions. This process happens in an air mass which covers most of the Antarctic continent and which is due to the prevailing dynamic conditions practically isolated from the surroundings. The active chlorine destroys after the return of the sun the ozone by catalytic cycles which are more complicated than these of the normal photochemistry. There is a tight relationship (feed back mechanisms) between chemistry and circulation.

1 Einleitung

Das atmosphärische Ozon ist in den letzten Jahren für den Laien zu einem eigentlichen Paradoxon geworden: Einerseits hört er von der Gefährdung der stratosphärischen Ozonschicht durch den Menschen – der Ozonschicht, die unseren unabdingbaren Schutzschild gegen die tödliche UV-C-Strahlung der Sonne ($\leq$ 280 nm) und den effizienten Filter für die biologisch wirksame UV-B-Strahlung (zwischen 280 und 320 nm) darstellt; andererseits klagt man über die zunehmende Belastung der bodennahen Luftschicht mit Ozon, welche die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze zu gefährden droht.

In Wirklichkeit sind dies zwei weitgehend getrennte Probleme. Die stratosphärische Ozonschicht übt ihre Schutzfunktion durch Fernwirkung aus, durch Absorption der durchfallenden Sonnenstrahlung. Mit dem bodennahen

Ozon hingegen haben wir unmittelbaren Kontakt; es befindet sich in der Luft, die wir atmen – und es ist giftiger als Chlor. (Ein Ozongehalt von über 100 ppb [Mischungsverhältnis 100 10^{-9}] am Arbeitsplatz ist unzulässig; der Grenzwert der Luftreinhalteverordnung liegt bei etwa 60 ppb, wird aber in grossen Teilen der Schweiz im Sommer häufig überschritten.)

Völlig unabhängig sind die beiden Probleme allerdings nicht, indem die beobachtete starke Zunahme des troposphärischen Ozons einen Teil des stratosphärischen Verlusts wettmachen kann (siehe Bild 6), dies ist aber keine wünschenswerte Methode zur Heilung der in der Höhe «erkrankten» Ozonschicht.

2 Ozonverteilung als Funktion von Photochemie und Transportprozessen

2.1 Die klassische Theorie

Vor bald 60 Jahren hatte S. Chapman (1930) die Existenz einer Ozonschicht in der Stratosphäre mit einer einfachen, aus nur 4 Reaktionen bestehenden photochemischen Theorie erklärt, wobei der primäre Vorgang die Photodissoziation des Sauerstoffmoleküls durch kurzwellige UV-Strahlung der Sonne war:

(1) $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$ $\quad \lambda \leq 242\,\text{nm}$ $\quad f_2$

gefolgt von der Ozonbildung im Dreierstoss

(2) $O_2 + O + M \rightarrow O_3 + M$ $\quad k_2$

(3) $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ $\quad \lambda \leq 1180\,\text{nm}$ $\quad f_3$

(4) $O_3 + O \rightarrow 2O_2$ $\quad k_3$

Die Photodissoziation des Ozons (Reaktion 3), die wegen seiner geringen Stabilität auch durch längerwelliges Licht möglich ist, führt nicht zur endgültigen Beseitigung von O_3, da dieses durch Reaktion (2) sofort zurückgebildet wird. Erst durch die direkte Reaktion (4) der beiden «ungeraden» Sauerstoffteilchen werden diese wieder in O_2 zurückgeführt. Der Ozongehalt ist durch ein Gleichgewicht zwischen Bildung (1) und Zerstörung (4) der ungeraden Sauerstoffteilchen bedingt, wobei die Wirksamkeit von (4) wesentlich durch das sich viel schneller einstellende Gleichgewicht zwischen den beiden Umwandlungsreaktionen (2) und (3) bestimmt ist. Die Gleichgewichtskonzentration ergibt sich aus den 4 Reaktionen zu:

$$n_3 = n_2^{3/2} \sqrt{\frac{f_2}{f_3} \cdot k} \qquad \text{mit } k \equiv \frac{k_2}{k_3} \cdot s$$

Dabei sind n_3 und n_2 die Konzentrationen von Ozon- resp. Sauerstoffmolekülen, f_2 und f_3 die Dissoziationsgeschwindigkeiten von O_2 und O_3, k_2 und k_3 die Reaktionsgeschwindigkeit von (2) und (3) und s das Verhältnis von Luft- zu Sauerstoffmolekülen.

Die Halbwertzeit der Gleichgewichtseinstellung beträgt:

$$\tau = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot n_2}{f_2 \cdot f_3}}$$

Aus der Höhenabhängigkeit der einzelnen Parameter ergibt sich das beobachtete Ozonmaximum bei etwa 25 km, während die Halbwertszeit von ungefähr einer Stunde an der Stratopause (Obergrenze der Stratosphäre bei ca. 50 km) auf über ein Jahr in der unteren Stratosphäre (unterhalb 20–25 km) ansteigt. Da bei Ozonbildung und -abbau nur die Hauptbestandteile der Atmosphäre eine Rolle spielen, schien die Ozonschicht nach der Chapmanschen Theorie der menschlichen Unvernunft entzogen; leider hat sich dies, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, nicht bestätigt.

Als die Theorie in den 40er Jahren quantitativ ausgewertet wurde, zeigte sich eine Diskrepanz zwischen der berechneten und der beobachteten Breitenabhängigkeit des Gesamtozons, und auch die jahreszeitliche Variation war phasenverschoben. Die Theorie verlangte ein Ozonmaximum am Äquator und ein Minimum am Pol sowie ein Sommermaximum und ein Winterminimum. Beobachtet wurden ein ganzjähriges Minimum über den Tropen, ein Maximum im frühen Frühjahr in der Arktis und minimale Werte im Herbst. Spätere Messungen im geophysikalischen Jahr (1957/58) zeigten auch noch eine Asymmetrie zwischen Arktis und Antarktis, indem das Frühjahrsmaximum in letzterer um 2 Monate verspätet auftrat und wesentlich schwächer war als über dem Nordpolargebiet (Bild 1).

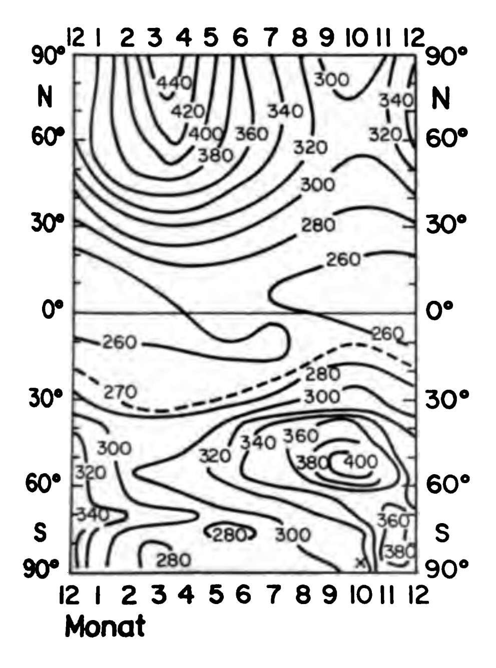


Bild 1 Beobachtete Ozonverteilung (um 1970) als Funktion von geographischer Breite und Jahreszeit. Isolinien in Dobson-Einheiten. ×: Lage des heutigen Ozonlochs.

Fig. 1 Observed ozone distribution (around 1970) as a function of latitude and season. Isolines in Dobson units. ×: position of the present ozone hole.

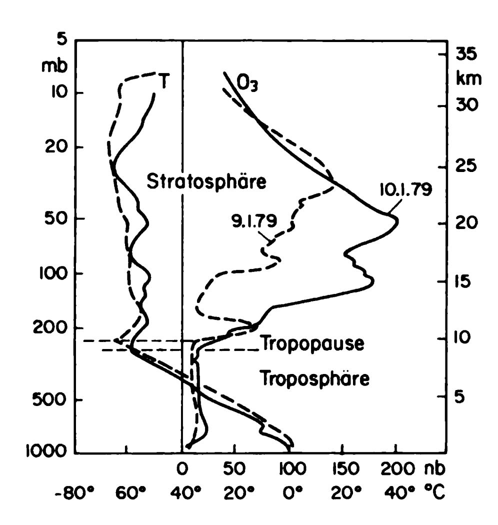


Bild 2 Tag-zu-Tag-Änderung der vertikalen Ozon- und Temperaturverteilung über Payerne.

Fig. 2 Day-to-day variation of the vertical ozone and temperature distribution over Payerne.

Diese Widersprüche konnten durch einen während des Winterhalbjahres polwärts gerichteten Ozonfluss aus den Tropen und zum Teil sogar aus der Sommerhemisphäre erklärt werden, der im aussertropischen Bereich durch die der winterlichen stratosphärischen Westströmung überlagerten sog. planetaren Wellen (sie entsprechen den Hoch- und Tiefdruckgebieten der troposphärischen Wetterkarten) verursacht wird. Er lässt den Ozongehalt unterhalb von etwa 30 km in winterlichen mittleren und hohen Breiten, wo die photochemischen Prozesse langsam ablaufen, weit über den Gleichgewichtswert ansteigen, während er in den Tropen darunter absinkt. Die Ozonverteilung war damit durch die Überlagerung von photochemischen und Transportprozessen bedingt. Die ab etwa 1960 durchgeführten Messungen der vertikalen Ozonverteilung bestätigten diese Annahme: Die Widersprüche zwischen Beobachtung und reiner photochemischer Theorie sind durch die Verhältnisse in der unteren Stratosphäre bedingt, während bereits die mittlere Stratosphäre (um 30 km) ein Ozonmaximum über den Tropen aufweist. Bild 2 zeigt ein Beispiel der grossen Tag-zu-Tag-Schwankungen, die in der unteren Stratosphäre im Zusammenhang mit meteorologischen Vorgängen auftreten können. Eine ausführlichere Darstellung der in diesem Abschnitt beschriebenen Vorgänge findet sich in U. U. Dütsch (1980).

2.2 Die moderne photochemische Theorie: Katalytischer Ozonabbau durch Radikale

Die verbesserte Kenntnis der photochemischen Parameter wie auch der vertikalen Ozonverteilung (vor allem auch oberhalb 30 km) wie sie im Laufe der 60er Jahre sukzessive erreicht wurde, zeigte, dass die Kombination von photochemischer und Transporttheorie die beobachtete Ozonverteilung zwar in gro-

ben Zügen, nicht aber im Detail erklären konnte. Vor allem war es nicht möglich, die vertikale Verteilung im oberen, infolge der kleinen Halbwertszeit durch Transportvorgänge relativ wenig beeinflussten Teil der Ozonschicht quantitativ richtig darzustellen.

Ab Mitte der 60er Jahre kam nun eine stufenweise Weiterentwicklung der photochemischen Theorie in Gang, die hier nicht in ihrem historischen Ablauf beschrieben, sondern übersichtsmässig in der heute ereichten Form dargestellt werden soll. In bezug auf die Stratosphäre wurde im wesentlichen nur der Ozonabbau betroffen, dagegen wurden für die Troposphäre und die unterste Stratosphäre auch neue Produktionsmechanismen aufgezeigt, die hier aber nicht weiter diskutiert werden sollen.

Die wichtigste Entdeckung war, dass der Ozonabbau durch katalytische Kreisprozesse mit reaktiven Radikalen (Teilchen mit ungerader Elektronenzahl) beschleunigt wird, wobei drei Gruppen zu unterscheiden sind:

I. (5) $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
(6) $NO_2 + O \rightarrow NO_2 + O_2$

$O_3 + O \rightarrow 2O_2$ wie (4)

II. (7) $Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$
(8) $ClO + O \rightarrow Cl + O_2$

$O_3 + O \rightarrow 2O_2$ wie (4)

III. Die etwas komplexeren Reaktionen mit den HO_X-Radikalen (H, OH, HO_2) führen neben

(4) $O_3 + O \rightarrow 2O_2$ auch zu den Gesamtreaktionen:
(9) $O_3 + O_3 \rightarrow 3O_2$ (in der unteren Stratosphäre), und
(10) $O + O \rightarrow O_2$ (in der oberen Stratosphäre),

was aber für die Bilanz keinen wesentlichen Unterschied gegenüber (4) bedeutet, da wegen der raschen Umwandlung zwischen O und O_3 [Reaktionen (2) und (3)] nur die Gesamtzahl der in O_2 rückgeführten ungeraden Sauerstoffteilchen eine Rolle spielt.

NO_2 kann statt durch Reaktion (6) auch durch

(11) $NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O$

in NO zurückverwandelt werden und ebenso ClO durch

(12) $ClO + NO \rightarrow Cl + NO_2$ in Cl

beides ohne Verlust an ungeradem Sauerstoff.

Da die Sauerstoffatomkonzentration und oberhalb 30 km auch die NO-Konzentration mit der Höhe rasch zunehmen, ist die Wirksamkeit der Radikale stark höhenabhängig (vergl. Bild 4).

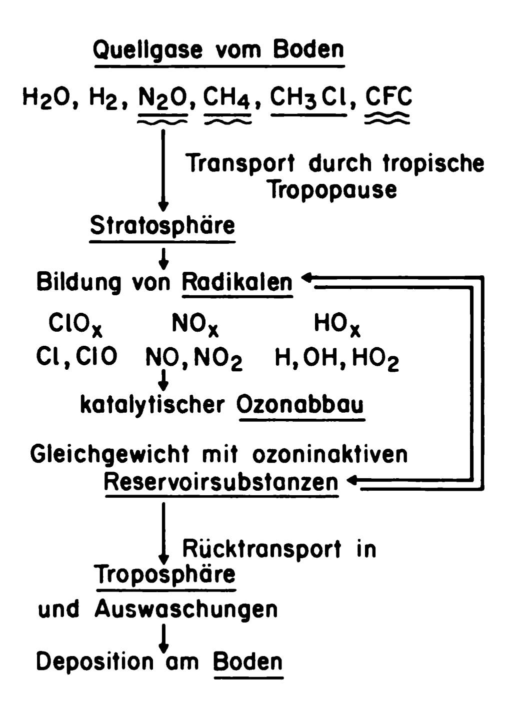


Bild 3 Schema der modernen Ozonphotochemie und ihrer Verknüpfung mit Transportvorgängen.

Fig. 3 Scheme of the modern ozone photochemistry and of its interaction with transport processes.

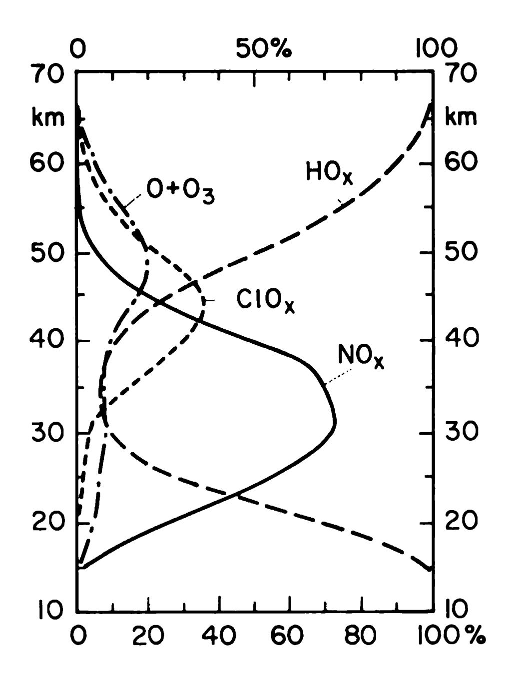


Bild 4 Prozentualer Beitrag der einzelnen Radikalgruppen zum Ozonabbau als Funktion der Höhe im Vergleich mit der direkten Reaktion (4).

Fig. 4 Percentage contribution of the different radical groups to the ozone distruction as a function of height in comparison with the direct reaction (4).

Die ozonabbauende Wirksamkeit der Radikale steigt mit ihrer Konzentration und diese wird vor allem beim ClO_X (Cl, ClO) und, wenn auch in geringerem Masse, beim NO_X (NO, NO_2) durch den Menschen beeinflusst. Damit kann im Gegensatz zur Aussage der Chapman-Theorie, die Ozonschicht durch den Menschen beeinträchtigt werden.

2.3 Die Bildung der Radikale aus den Quellsubstanzen

Die Radikale entstehen aus an sich sehr stabilen Verbindungen, die Quellsubstanzen genannt werden, durch Reaktionen, die vorzugsweise in der Stratosphäre ablaufen und zwar:

a) durch Reaktion mit elektronisch angeregten Sauerstoffatomen [$O(^1D)O^*$], die bei der Photodissoziation von Ozon durch Wellenlängen ≤ 310 nm entstehen. Das geschieht auch in der Troposphäre, doch wird dort der Gehalt an O^* durch die dichteabhängige Stossdesaktivierung mit N_2 oder O_2 sehr niedrig gehalten.

(14) $O^* + M \rightarrow O + M$

Beispiele solcher Radikalbildung sind

(15) $H_2O + O^* \rightarrow 2OH$
(16) $N_2O + O^* \rightarrow 2NO$

b) durch Reaktion mit OH-Radikalen, denen deshalb in der Luftchemie eine hervorragende Rolle zukommt, z. B.:

(17) $CH_3Cl + OH \rightarrow H_2O + CH_2Cl$

mit darauf folgender Abspaltung von Cl aus dem instabilen Radikal CH_2Cl

(18) $CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$

sowie

c) durch Photodissoziation durch die gleichen Wellenlängen (≈ 210 nm), die durch O_2-Spaltung zur Ozonbildung führen. Da diese Wellenlängen bereits in der Stratosphäre völlig absorbiert werden, ist dieser Vorgang auf diese hohe Schicht beschränkt, z. B.

(19) $CCl_3F + h\nu \rightarrow CCl_2F + Cl$
(20) $ClCl_2F_2 + h\nu \rightarrow CClF_2 + Cl$

worauf die dabei entstehenden Chlorfluorkohlenstoffradikale unter Bildung zusätzlicher Cl-Radikale rasch weiterabgebaut werden.

Die Quellsubstanzen stammen alle vom Boden oder werden unmittelbar darüber in die Atmosphäre gebracht. Viele sind vorwiegend oder rein biogenen Ursprungs (CH_4, N_2O, ClH_3Cl), andere rein anthropogener Herkunft (Chlorfluorkohlenstoffverbindungen, CFC). Die biogene Produktion von CH_4 wird durch den Menschen begünstigt (Reisbau, Viehzucht usw.), ebenso dieje-

nige von N_2O (Stickstoffkunstdünger); dieses Quellgas entsteht aber auch bei Verbrennungsvorgängen.

Die Quellsubstanzen gelangen im wesentlichen durch die tropische Tropopause hindurch in die Stratosphäre, wo dann der Abbau, d.h. Umwandlung in Radikale auf dem weiteren Weg in hohe Breiten, der denjenigen des Ozons selbst entspricht, erfolgt; dieser Transport geht in die jeweilige Winterhemisphäre.

2.4 Radikale und Reservoirsubstanzen

Während die HO_X-Radikale durch die Reaktionen

(21) $OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$ sowie
(22) $H + HO_2 \rightarrow H_2 + O_2$

wieder in Quellsubstanzen zurückverwandelt und deshalb mit diesen bei relativ kleinen Konzentrationen in einem Gleichgewicht stehen, ist die beschriebene Bildung der NO_X- und ClO_X-Radikale irreversibel. Die Umwandlung dieser Radikale in andere Substanzen, die zwar reaktiver sind als Quellsubstanzen, das Ozon jedoch nicht abbauen, verhindert aber einen unlimitierten Anstieg. Einige der wichtigsten dieser Vorgänge – meist Reaktionen zwischen Radikalen verschiedener Gruppen – seien im folgenden angeführt:

(23) $NO_2 + OH + M \rightarrow HNO_3 + M$
(24) $NO_2 + ClO + M \rightarrow ClONO_2 + M$
(25) $Cl + CH_4 \rightarrow HCl + CH_3$

Diese Überführung in ozoninaktive Substanzen ist allerdings nicht endgültig; diese können alle wieder in Radikale zurückverwandelt werden; sie werden daher als Reservoirsubstanzen bezeichnet, z.B.

(26) $HNO_3 + h\nu \rightarrow NO_2 + OH$
(26a) $HNO_3 + OH \rightarrow NO_3 + H_2O$
(27) $ClONO_2 + h\nu \rightarrow ClO + NO_2$
(28) $HCl + OH \rightarrow Cl + H_2O$

Von der höhenabhängigen Lage des sich einstellenden Gleichgewichts zwischen aktiven Radikalen und inaktiven Reservoirsubstanzen hängt die Intensität des Ozonabbaus durch die einzelnen Radikalgruppen wesentlich ab (vgl. Bild 4).

Da es in der Stratosphäre keine Reaktionen gibt, welche entweder Radikale oder Reservoirsubstanzen irreversibel aus diesem Gleichgewicht wegnehmen, und ausserdem der natürliche Reinigungsvorgang der Troposphäre, der Niederschlagsprozess, in der hohen Schicht fehlt, würde die Radikalkonzentration und damit die Ozonzerstörung doch laufend ansteigen, wenn nicht durch Übertritt von stratosphärischen Luftpaketen in die Troposphäre Reser-

voirsubstanzen und Radikale in diese zurückgeführt würden – zusammen mit Ozon übrigens – wo sie dann ausgewaschen werden.

2.5 Photochemische Modelle: Kombination von chemischen Prozessen und Transport aller beteiligten Substanzen

An Stelle der vier Reaktionen zwischen nur vier Substanzen der Chapman-Theorie sind nun über 100 gleichzeitig ablaufende Umsetzungen zwischen einer Vielzahl von Verbindungen getreten. Den schon in der klassischen Theorie wichtigen Transportvorgängen kommt eine noch grössere Bedeutung zu, da nicht nur das Ozon selbst, sondern sowohl Quell- und Reservoirsubstanzen wie auch Radikale verlagert werden. Alle chemischen Prozesse sind in einem zwischen Troposphäre und Stratosphäre sich abspielenden geschlossenen Kreislauf eingebettet (Bild 3).

Die Berechnung der Ozonverteilung und ihrer zukünftigen Entwicklung lässt sich nun nur noch mit sehr komplexen Computermodellen durchführen. Je naturgetreuer dabei die Transportvorgänge simuliert werden sollen, desto aufwendiger werden diese Rechnungen. In eindimensionalen (1-D) Modellen wird der Transport auf vertikale Durchmischung durch Turbulenz beschränkt, indem die Vorgänge horizontal über die ganze Erde gemittelt betrachtet werden, d.h. der Ablauf zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche in 30° Breite als repräsentativ betrachtet wird. Man erhält damit weder Jahresgang noch Breitenabhängigkeit der berechneten vertikalen Ozonverteilung. Dieses stark vereinfachte Verfahren ist wichtig für den Vergleich verschiedener Szenarien betreffend die anthropogen beeinflussten Quellgase – vor allem der CPCs ($CFCl_3$ CF_2Cl_2 und andere) sowie von N_2O und CH_4 – und die durch den kontinuierlichen CO_2-Anstieg verursachte Temperaturänderung (im oberen Teil der Stratosphäre im Gegensatz zur Troposphäre eine Abkühlung); ebenso können numerische Experimente über die Bedeutung einzelner wichtiger Reaktionen und Substanzen für das ganze System ausgeführt werden.

Die Berechnungen ergeben die in Bild 4 gezeigte Aufteilung des Ozonabbaus auf die drei Radikalgruppen im Vergleich mit der Wirkung der direkten Zerstörungsreaktion (4) der klassischen Theorie als Funktion der Höhe. Die direkte Reaktion (4) gibt nach diesen Erkenntnissen nur einen Beitrag von 10 bis maximal 20%. In der Mesosphäre (oberhalb 50 km) und unterhalb 20 km dominiert der HO_X-Abbau, wobei aber der mesosphärische Beitrag zum Gesamtozon verschwindend klein ist, und unterhalb 20 km die chemischen Prozesse so langsam verlaufen, dass sie gegenüber den Transportvorgängen kaum mehr ins Gewicht fallen. Im eigentlichen Ozonbildungsbereich zwischen 25 und 35 km steht der NO_X-Abbau mit einem Anteil bis zu ¾ im Vordergrund; er ist damit der dominierende Prozess im Hinblick auf das Gesamtozon. Während die NO_X-Konzentration nach heutigen Kenntnissen nur langsam zunimmt, steigt der ClO_X-Gehalt rasch; in der oberen Stratosphäre (um 40 km) ist der ClO_X-Abbau bereits der dominante Vorgang.

Die Wirksamkeit der einzelnen Radikalgruppen wird einerseits durch die Lage des Gleichgewichts zwischen Radikalen und Reservoirsubstanzen bestimmt, anderseits ist sie durch die von oben nach unten rasch abnehmende Konzentration der Sauerstoffatome bedingt [für NO_X und ClO_X wegen der Reaktionen (6) und (8)]; während es oberhalb 55–60 km mehr atomaren Sauerstoff als Ozon gibt, ist das Verhältnis in 30 km $1:2{,}5 \cdot 10^4$, in 20 km $1:1{,}5 \cdot 10^6$.

Im zweidimensionalen (2-D) Modell wird die Breitenabhängigkeit und damit auch der jahreszeitliche Gang des Ozons berücksichtigt. Es wird aber längs Breitenkreisen gemittelt; damit kann der meridionale Transport, der nicht einfach durch eine meridionale Zirkulationszelle, sondern ausserhalb der Tropen vor allem auch durch sogenannten Grossaustausch erfolgt, d.h. durch vorwiegend quasihorizontale Strömungen, wie sie mit wandernden Hoch- und Tiefdruckgebieten verbunden sind, nicht im Detail modelliert werden, sondern muss durch einen geeigneten Ansatz «parameterisiert» werden. Der Rechenaufwand ist sehr viel höher als im 1-D-Fall und das Resultat zwar besser mit den Beobachtungen vergleichbar, aber wegen der unvermeidlichen Vereinfachung immer noch mit Mängeln behaftet.

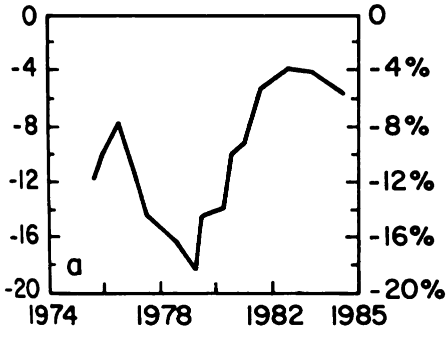
Das dreidimensionale (3-D) Modell, das im dynamischen Teil den in der Klimasimulation verwendeten Modellen der allgemeinen Zirkulation entspricht, wäre die ideale Lösung, lässt sich aber mit der vollen Chemie gekoppelt auch mit den modernsten Computern wegen des unerhörten Rechenaufwandes nicht für die Bestimmung der Entwicklung über viele Jahre hinweg verwenden. Die im folgenden Abschnitt aufgeführten Prognosen sind mit 1-D- oder 2-D-Modellen gerechnet.

2.6 Prognosen über den anthropogenen Einfluss

In den frühen 70er Jahren war man über den möglichen Einfluss einer grossen (auch seither nicht realisierten) Überschallflugzeugflotte auf die Ozonschicht besorgt, wegen des mit ihr verbundenen direkten NO_X-Ausstosses in die Stratosphäre. Seither ist die zu erwartende Schwächung der Ozonschicht durch ClO_X-Radikale in den Vordergrund getreten; dies nachdem M.J. Molina und F.S. Rowland (1974) entdeckt hatten, dass die CFC in der Stratosphäre durch Photodissoziation solche Radikale abgeben.

Die Prognosen waren in den folgenden 10 Jahren grossen Schwankungen unterworfen (siehe Bild 5a), sowohl wegen der Entdeckung neuer, vorher nicht berücksichtigter Reaktionen bzw. Substanzen, wie auch infolge neuer Werte für wichtige Reaktionsgeschwindigkeiten.

Die in Bild 5a aufgeführten Änderungen des atmosphärischen Ozongehalts gelten für die Annahme eines zeitlich konstant bleibenden CFC-Ausstosses in die Atmosphäre und sind keine Momentwerte, sondern werden erst in etwa 100 Jahren erreicht, da heute wegen der langen Transportzeiten und der langsamen stratosphärischen Umwandlung von CFC in Chlorradikale noch längst kein Gleichgewicht zwischen dem CFC-Ausstoss in die Troposphäre



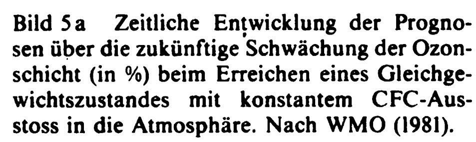


Bild 5a Zeitliche Entwicklung der Prognosen über die zukünftige Schwächung der Ozonschicht (in %) beim Erreichen eines Gleichgewichtszustandes mit konstantem CFC-Ausstoss in die Atmosphäre. Nach WMO (1981).

Fig. 5a Development with time of the forecast on the future reduction of the ozone layer (in %) after a new equilibrium with constant CFC output into the atmosphere is reached (after WMO 1981).

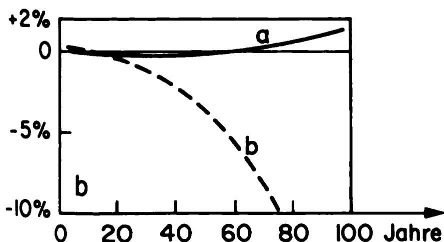


Bild 5b Zeitliche Veränderung des Gesamtozons unter Berücksichtigung des extrapolierten Trends der anderen den Ozonhaushalt beeinflussenden Spurengase (CH_4, N_2O, CO_2): a) bei konstantem CFC-Ausstoss, b) bei einer jährlichen Zunahme um 3%. Nach WMO (1985).

Fig. 5b Development with time of total ozone taking into consideration the extrapolated trends of the other tracegases influencing the ozone budget (CH_4, N_2O, CO_2): a) assuming a constant CFC-output, b) assuming a 3% increase of this output per year (after WMO 1985).

und dem auf die Stratosphäre beschränkten Abbau dieser Substanzen besteht und damit auch noch keine zeitlich konstante Auswirkung auf das Ozon.

In den letzten 5 Jahren haben sich die Vorhersagen bei relativ kleinen Verlustwerten stabilisiert. Wenn die prognostizierten Änderungen aller anderen für den Ozonhaushalt wichtigen Quellgase und vor allem auch die Zunahme des CO_2-Gehalts (Einwirkung durch den Temperatureffekt) berücksichtigt werden, ergibt sich sogar eher ein (nicht signifikanter) Anstieg. Man begann daher das CFC-Problem etwas zu verdrängen, obschon für eine nur dreiprozentige jährliche Zunahme im Ausstoss dieser Substanzen (was etwa der Wirklichkeit entsprach) bereits innert 70 Jahren ein Ozonverlust von 10% vorausgesagt wurde (Bild 5b).

Auch im Falle konstanten Gesamtozons wäre doch eine wesentliche Veränderung der vertikalen Verteilung des Gases zu erwarten. Einer Reduktion des O_3-Gehalts auf die Hälfte in etwa 40 km Höhe stünde eine Zunahme in unteren Schichten gegenüber (Bild 6), da nun vermehrt Sauerstoff dissoziierende Strahlung – die auch vom Ozon absorbiert wird – in tiefere Schichten vordringen kann (Selbstheilungseffekt). Daneben lässt die zunehmende Verschmutzung der Troposphäre den O_3-Gehalt dort durch smogähnliche Prozesse steigen.

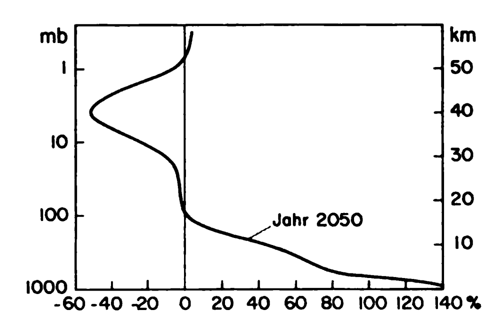


Bild 6 Änderung der Ozonkonzentration als Funktion der Höhe (in %) bis zum Jahr 2050 bei konstantem CFC-Ausstoss und Extrapolation des Trends der übrigen relevanten Spurengase. Nach P.J. Crutzen (1987).

Fig. 6 Change in ozone concentration (in %) as a function of height until 2050 (constant CFC-output and extrapolated trends of the trace gases mentioned under 5b). From P.J. Crutzen (1987).

Wenn eine solche Veränderung der Ozonschicht auch keine Zunahme der UV-B-Strahlung und damit keine der befürchteten biologischen Auswirkungen zur Folge hätte, so wäre sie doch klimawirksam – durch einen Beitrag zur Verstärkung des Treibhauseffekts und durch Veränderungen in der stratosphärischen Zirkulation.

3 Das Ozonloch

3.1 Die Entdeckung des Ozonlochs

Die Veröffentlichung von J.C. Farman et al. im Jahre 1985 schreckte die etwas beruhigten Gemüter wieder auf. Die ungefähr 30jährige Ozonmessreihe der britischen Forscher in Halley Bay (76° S) zeigte im antarktischen Frühling nach einer vorangehenden, von starken Jahr-zu-Jahr-Schwankungen überlagerten, langsamen Abnahme seit Ende der 70er Jahre einen rapiden, bereits etwa 40% erreichenden Rückgang des mittleren Gesamtozongehalts im Oktober (Bild 7). Diese erschreckende Beobachtung wurde rasch durch weitere Daten bestätigt, so durch die amerikanische Reihe am Südpol (Bild 7) und vor allem durch die Messungen des seit Ende 1978 im Umlauf befindlichen Forschungssatelliten Nimbus 7 (Bild 8). Das Phänomen wurde alsbald – etwas irreführend – als Ozonloch bezeichnet; es handelt sich in Wirklichkeit nicht um ein eigentliches Loch in der Schicht, sondern um eine regionale, allerdings sehr ausgeprägte Schwächung. Die Bezeichnung, die sich sofort eingebürgert hat, soll aber im folgenden weiter benutzt werden.

3.2 Photochemie versus Zirkulationsänderung

Was war der Grund für diese plötzliche Entwicklung? Nachdem die britischen Forscher auf die Parallelität zwischen der beobachteten Schwächung der antarktischen Ozonschicht und dem Anstieg des atmosphärischen CFC-Gehalts hingewiesen hatten, was eine anthropogene Ursache des «Lochs» implizierte, entstand eine heftige wissenschaftliche Kontroverse: Chemischer (anthropogen bedingter) Abbau oder Ozonverlust infolge veränderter Zirkulation.

Die Zirkulationshypothese beruhte auf zwei Annahmen: Verminderter Ozontransport aus niedrigen Breiten durch die planetaren Wellen, die in der Stratosphäre der winterlichen Weströmung überlagert sind, sowie aufsteigende Strömung über der Antarktis im Frühjahr – dies auf Grund gewisser Rechnungen zum Strahlungsbudget. Eine solche Strömung würde ozonarme Luft aus der Troposphäre in die untere Stratosphäre führen. Zur Stützung der Zirkulationshypothese wurde auf die beobachtete enge Korrelation zwischen Ozon- und Temperaturabnahme im Bereich des Ozonlochs während der 80er Jahre hingewiesen. Eine Verminderung des polwärts gerichteten Ozontransports durch planetare Wellen ginge nämlich mit der Abnahme des Wärmeflusses in dieser Richtung parallel, und eine aufsteigende Strömung würde durch adiabatische Expansion ebenfalls Abkühlung bewirken.

Gegen einen chemischen Abbau schien auch die Tatsache zu sprechen, dass, wie Messungen der vertikalen Verteilung zeigten (Bild 9), der Ozonverlust nicht, wie man auf Grund bisheriger Modelle hätte erwarten müssen, im oberen Teil der Stratosphäre stattfand, sondern auf die untere Stratosphäre konzentriert war. Hier war aber – nach dem bisherigen Verständnis – der Ozonabbau durch aktives Chlor und durch den Mangel an atomarem Sauerstoff behindert – dessen Konzentration hier um 4–5 Grössenordnungen kleiner ist als in der oberen Stratosphäre; Reaktion (8) wird damit sehr langsam.

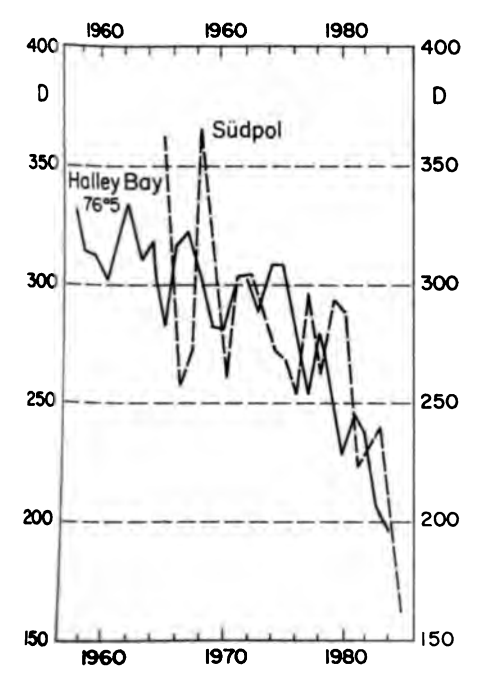


Bild 7 Beobachtete zeitliche Entwicklung des Oktobermittels des Gesamtozons in Dobson-Einheiten an zwei antarktischen Stationen. Nach Farman et al. (1985) und Komhyr et al. (1986).

Fig. 7 Observed development with time of the October mean value of total ozone in Dobson units for two Antarctic stations. From Farman et al. (1985) and Komhyr et al. (1986).

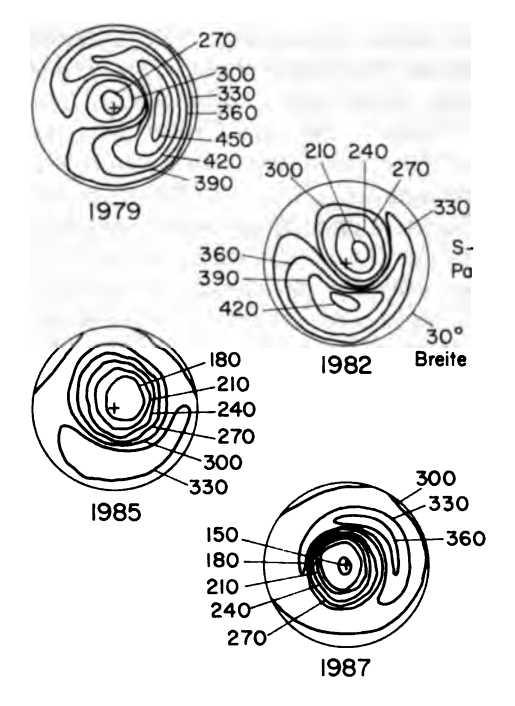


Bild 8 Entwicklung des Ozonlochs nach Messungen des Forschungssatelliten Nimbus 7. Isolinien des Gesamtozons in Dobson-Einheiten. +: Südpol, Umkreis: 30° S. Nach Stolanski et al. (1986) mit zusätzlicher Information.

Fig. 8 Development of the ozone hole from the measurements of the research satellite Nimbus 7. Isolines of total ozone in Dobson units. +: South pole, circumcircle at 30° S. From Stolanski et al. (1986) with additional information.

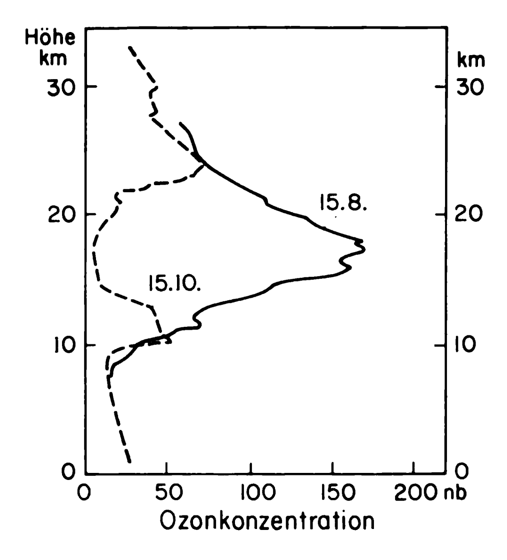


Bild 9 Bildung des Ozonlochs nach Rückkehr der Sonne am Ende der Polarnacht aus Messungen der vertikalen Ozonverteilung über Halley Bay, 76° S, im Frühjahr 1987.

Fig. 9 Formation of the ozone hole after the return of the sun at the end of the polar night above Halley Bay, 76° S, in spring 1987.

Ausserdem liegt in diesem Höhenbereich das Gleichgewicht zwischen aktivem Chlor und Reservoirgasen nach bisherigen Modellen ganz auf der Seite der letzteren.

Es gab aber auch gewichtige Gegenargumente. Die beobachtete vertikale Verteilung im antarktischen Frühjahr (Bild 9) – das ausgeprägte Minimum zwischen 16 und 20 km war nämlich durch ein sekundäres Maximum von der ozonarmen Troposphäre getrennt – liess sich nur schwer mit aufsteigender Strömung vereinbaren. Noch eindeutiger war der Befund aus Messungen der Konzentration von Quellgasen. Da diese aus der Troposphäre stammen, müsste aufsteigende Luftbewegung zu hohen Werten führen; in Wirklichkeit werden aber in der antarktischen unteren Stratosphäre gegenüber der Umgebung stark herabgesetzte Konzentrationen von N_2O, CH_4 und H_2O gemessen. Gegen verminderten Transport aus niedrigen Breiten als Ursache für das Ozonloch sprach der Ablauf seiner Bildung. Der Ozonverlust setzt, wie Bild 9 klar zeigt, erst am Ende der Polarnacht, nach Rückkehr der Sonne, ein; verminderter Transport müsste sich schon während der Polarnacht auswirken, und die Art der Ozonlochbildung zwischen August und Oktober impliziert eine aktive Ozonzerstörung.

Das Argument, die hohe Korrelation zwischen Ozon- und Temperaturrückgang während der Jahre der Ozonlochentwicklung sei eine eindeutige Stützung der Transporthypothese, lässt sich leicht entkräften. Da Ozon einen positiven Beitrag zur Strahlungsbilanz liefert, muss ein Ozonverlust Abkühlung zur Folge haben. Es musste nun aber noch gezeigt werden, durch was für neuartige chemische Prozesse es im antarktischen Frühjahr zum beobachteten Ozonabbau kommen konnte.

3.3 Spezielle atmosphärische Verhältnisse als Grundlage für eine neuartige Chemie

Die Ozonlochbildung kann nicht durch das in den Abschnitten 2.2–2.4 geschilderte photochemische Konzept erklärt werden. Das bedeutet, dass offenbar ein spezieller, für die antarktische untere Stratosphäre im Winter und Frühjahr charakteristischer Zustand der Atmosphäre die Voraussetzung für eine neuartige Chemie bildet. Dieser Bereich ist am Ende der Polarnacht ausserordentlich kalt, und zwar infolge des gegenüber der Nordhemisphäre beträchtlich verminderten meridionalen Wärmetransports, verursacht durch die unterschiedliche Wasser-Land-Verteilung, die sich bis in diese Höhe auswirkt. Die Mitteltemperaturen liegen bei −80 °C oder tiefer. Das hat zwei wichtige Auswirkungen: Aus meteorologischer Sicht führt dies auf Grund der Barometerformel – in der kalten Luft nimmt der Druck mit der Höhe rascher ab als in der Umgebung – zur Bildung eines nach oben an Intensität gewinnenden, ausserordentlich kräftigen Zirkumpolarwirbels. Moderne dynamische Theorien zeigen, dass ein solches Gebilde, wenn es einmal entstanden ist, praktisch undurchlässig wird (M. McIntyre, 1988), d.h. dass Luft weder

ein- noch austreten kann, abgesehen von Erosionsvorgängen auf der Aussenseite des Wirbels. Der Zirkumpolarwirbel stellt damit gewissermassen eine geschlossene Retorte dar, in der nun die neuartige Chemie ohne direkte Wechselwirkung mit der Aussenwelt abläuft.

Die physikalisch-chemischen Prozesse, die hier in Gang kommen, sind ebenfalls durch die extrem tiefe Temperatur bedingt. Es bilden sich in der sonst wolkenfreien Stratosphäre Wolken (PSC = polar stratospheric clouds), die aus feinen Eiskristallen bestehen, d.h. eine Art stratosphärische Cirruswolken darstellen (D.J. Hofmann et al., 1988; L.R. Poole et al., 1988; L.R. Poole und M.P. McCormick, 1988). An der grossen Oberfläche dieser feinen Eiskristalle spielen sich nun *heterogene* chemische Reaktionen (zwischen festem und gasförmigem Zustand) ab – bis dahin wurden die Vorgänge in der Stratosphäre als reine Gasphasenchemie betrachtet.

Während der Polarnacht wird gasförmiges N_2O_5, das durch die Reaktionen

(29) $NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2$ und
(30) $NO_2 + NO_3 + M \rightarrow N_2O_5 + M$ gebildet wurde,

heterogen mit dem festen Wasser an der Oberfläche der Eiskristalle in Salpetersäure übergeführt (M.A. Tolbert et al., 1988a):

(31) $N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$,

ein Prozess, der sich in der homogenen Gasphase nur sehr langsam abspielen würde. Die entstandene Salpetersäure kristallisiert bei den herrschenden tiefen Temperaturen aus, wohl meist in Mischkristallen ($HNO_3\ 3H_2O$) mit Wasser. Die Wolken werden dadurch verdichtet und die heterogene Reaktion beschleunigt. Die Stickoxyde inklusive Salpetersäure scheiden damit aus der Gasphase aus, was eine wesentliche Voraussetzung für die im folgenden beschriebene Entwicklung des Ozonlochs ist. Möglicherweise tragen auch hydratisierte Ionen zur Umwandlung von N_2O_5 in Salpetersäure bei (P.J. Crutzen und F. Arnold, 1986).

Heterogene Reaktionen spielen sich auch zwischen der Reservoirsubstanz $ClONO_2$ (gasförmig) und Wasser sowie der zweiten Chlorreservoirverbindung HCl, die beide im Kristallgitter enthalten sind, ab (M.A. Tolbert et al., 1988b):

(32) $ClONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOCl$ und
(33) $ClONO_2 + HCl \rightarrow HNO_3 + Cl_2$

Die beiden dabei gebildeten (gasförmigen) Chlorverbindungen werden nach Rückkehr der Sonne rasch in aktive Chlorradikale umgewandelt,

(34) $HOCl + h\nu \rightarrow Cl + OH$ und
(35) $Cl_2 + h\nu \rightarrow 2Cl$

Aktives Chlor kann aus HCl auch mit – nach Reaktion (15) gebildeten – OH-Radikale, durch Reaktion (28) entstehen, da die OH-Radikale wegen des Fehlens der Stickoxide nicht vorrangig durch katalytische Kreisprozesse mit NO_2 und HNO_3 verbraucht wurden.

Entscheidend wirkt sich das Fehlen des Stickoxids im Ausbleiben der Desaktivierungsreaktion (24) aus; nach Rückkehr der Sonne werden damit in kurzer Zeit sehr hohe Konzentrationen an aktivem Chlor erreicht, was den Ozonabbau ohne Beteiligung des atomaren Sauerstoffs ermöglicht.

Nach heutigen Kenntnissen gehen etwa 75–80% des Ozonabbaus auf den folgenden katalytischen Zyklus zurück (J.G. Anderson et al., 1988, M.J. Molina et al., 1988):

(36)	$ClO + ClO + M$	$\rightarrow$	$ClOOCl + M$
(37)	$ClOOCl + h\nu$	$\rightarrow$	$Cl + OOCl$
(38)	$OOCl + M$	$\rightarrow$	$Cl + O_2 + M$
(39)	$2(Cl + O_3)$	$\rightarrow$	$2O_2 + 2ClO$
Total (40)	$2O_3$	$\rightarrow$	$3O_2$

Der Ozonabbau kann auch durch katalytische Zyklen, an denen zwei Radikalgruppen beteiligt sind, erfolgen, z. B.:

(41)	$ClO + BrO$	$\rightarrow$	$Br + OClO$
(42)	$OClO + h\nu$	$\rightarrow$	$Cl + O_2$
(43)	$Cl + O_3$	$\rightarrow$	$ClO + O_2$
(44)	$Br + O_3$	$\rightarrow$	$BrO + O_2$
Total (40)	$2O_3$	$\rightarrow$	$3O_2$

BrO_X stammt vorwiegend aus sogenannten Halonen, d.h. CFC-Verbindungen, in denen ein Cl- durch ein Br-Atom ersetzt ist, wie etwa $CBrClF_2$ oder $CBrCl_2F$; diese ebenfalls anthropogenen Verbindungen werden vor allem als Feuerlöschmittel verwendet. Zunächst wurde von einigen Autoren (M.B. McElroy et al., 1986) dieser Abbauzyklus als der wichtigste betrachtet. – Messungen (Sanders et al., 1988) haben inzwischen gezeigt, dass im «Ozonlochbereich» die BrO-Konzentration gegenwärtig noch 100mal niedriger ist als diejenige von ClO und damit der Beitrag dieses Zyklus nicht mehr als 10–15% beträgt. – Auch ein gemeinsamer katalytischer Zyklus von ClO_X und HO_X-Radikalen kann zum Abbau beitragen (P.J. Crutzen und F. Arnold, 1988).

Die Existenz der in diesem Abschnitt diskutierten heterogenen Reaktionen, welche die Grundlage für die Entwicklung hoher Konzentrationen aktiven Chlors (1,5 ppb ClO) bilden, ist neuerdings in Laboratoriumsversuchen bestätigt worden (M.T. Leu, 1988, Molina, 1988, M.A. Tolbert et al., 1988a). Ebenso konnte im Labor gezeigt werden, dass der dominierende Abbauzyklus 36–39 bei den gemessenen ClO-Konzentrationen eine Ozonzerstörungsge-

schwindigkeit ergibt, welche der in der Natur beobachteten entspricht (J.G. Anderson et al., 1988).

3.4 Bestätigung der Theorie durch Messungen in der Antarktis

Damit war nun eine konsistente Theorie der Ozonlochbildung entwickelt worden – es blieb noch die Absicherung durch Beobachtungen im Feld; diese ist inzwischen durch die amerikanischen Ozonexpeditionen im antarktischen Frühjahr 1986 und 1987 erfolgt.

Die Existenz einer abgeschlossenen «Retorte» konnte verifiziert werden. Gleichzeitige Messungen der vertikalen Verteilung in gleicher Breite innerhalb und ausserhalb des Zirkumpolarwirbels – dies ist wegen dessen vielfach exzentrischen Lage zum Pol möglich – zeigten eine eindeutige «Ozonloch»- und eine normale Verteilung (Bild 10). Flugzeugpenetrationen in 18–20 km Höhe ergaben innerhalb des Zirkumpolarwirbels eine 100mal höhere Konzentration an aktivem Chlor (ClO) als unmittelbar ausserhalb, und sogar 500mal mehr als in gleicher Höhe in mittleren Breiten (Anderson et al., 1988). OClO, das als Zwischenprodukt in gewissen katalytischen Ozonabbauzyklen auftritt (Reaktion 41), wurde ebenfalls in stark erhöhten Konzentrationen gefunden (S. Solomon et al., 1987). Zwischen ClO- und Ozonkonzentration wurde innerhalb des Wirbels – in Zusammenhang mit schichtweise auftretenden PSC – eine hohe Antikorrelation gemessen, was die Bedeutung von ClO für den Ozonabbau zeigt. Der in der vertikalen Säule vorhandene Stickstoffdioxidgehalt war ungewöhnlich niedrig – was das Verschwinden dieser Substanzen in der unteren Stratosphäre anzeigt; tatsächlich lag der NO-Wert in

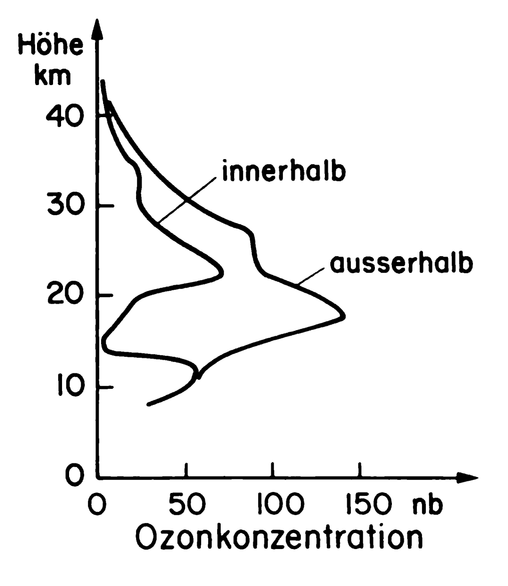


Bild 10 Gleichzeitige vertikale Ozonverteilung in 72° S innerhalb und ausserhalb des antarktischen Zirkumpolarwirbels (i.e. «Retorte») nach Messungen des Satelliten SAGE II.

Fig. 10 Simultaneous vertical ozone distribution at 72° S inside and outside the Antarctic circumpolar vortex (i.e. the containment) from measurement of the satellite SAGE II.

18 km Höhe unter der instrumentellen Messgrenze (Fahey et al., 1988); schliesslich wurden die auch erwarteten salpetersäurehaltigen Kristalle gefunden.

3.5 Zusammenwirken von Chemie und Zirkulation

Wenn auch im Detail – in bezug auf die einzelnen katalytischen Abbauzyklen und einzelne heterogene Reaktionen – Veränderungen noch möglich sind, kann an der grundlegenden Feststellung, dass der zur Bildung des Ozonlochs führende Vorgang der photochemische Ozonabbau durch aktiviertes anthropogenes Chlor sei, nicht mehr gezweifelt werden. Dennoch war die ursprüngliche Fragestellung: Chemie *oder* Zirkulation falsch; es muss vielmehr Chemie *und* Zirkulation heissen.

Die spezifischen südhemisphärischen Zirkulationsverhältnisse mit ihrem gegenüber der Nordhemisphäre verminderten meridionalen Wärmetransport bewirken die extreme Kälte am Ende der Polarnacht und damit die Bildung des äusserst kräftigen Zirkumpolarwirbels, welche die Voraussetzung für die Aktivierung des anthropogenen Chlors und damit des Ozonabbaus sind. Auch die Jahr-zu-Jahr-Variabilität, speziell die quasizweijährige Schwankung der stratosphärischen Zirkulation – ausgelöst durch die 26monatige Schwingung des tropischen stratosphärischen Windsystems –, hat einen deutlichen Einfluss auf die Intensität des Ozonlochs (Bild 11). Auf ein erstes Maximum 1985 der Lochbildung folgte 1986 eine Abschwächung und auf den Rekordwert von 1987 eine noch kräftigere Erholung 1988. Das Ausmass dieser Schwankungen kann nur auf Grund der Rückkoppelungseffekte zwischen Chemie und Zirkulation verstanden werden: Eine zirkulationsbedingte tiefere Temperatur bewirkt mehr PSC, damit eine Verstärkung der heterogenen Prozesse und vermehrten Ozonabbau; dieser wiederum führt via Strahlungsbilanz zur weiteren Abkühlung usw. Durch diese Rückkoppelungseffekte ist auch die Lebensdauer des Zirkumpolarwirbels um 1–1½ Monate vergrössert worden – 1987 erfolgte sein Zusammenbruch erst gegen Ende November. Extrem ausgedrückt kann man sagen, dass die antarktische Ozonschicht auf Grund des erhöhten Chlorgehalts fast instabil geworden ist.

3.6 Hemisphärische Auswirkungen

Nach den Beobachtungen (vgl. Bild 10) kann angenommen werden, dass der photochemische Ozonabbau nach Rückkehr der Sonne auf den Bereich des antarktischen Zirkumpolarwirbels beschränkt ist. Dennoch kann nicht erwartet werden, dass er keine Auswirkung ausserhalb dieses Bereiches habe. Während der Ozonlochbildung werden etwa 4% des gesamten hemisphärischen Ozongehalts zerstört, was sich wegen der Bedeutung der Transportvorgänge auf das hemisphärische Budget auswirken muss. Beim Zusammenbruch des Polarwirbels beim Übergang zur sommerlichen Zirkulation vermischt sich

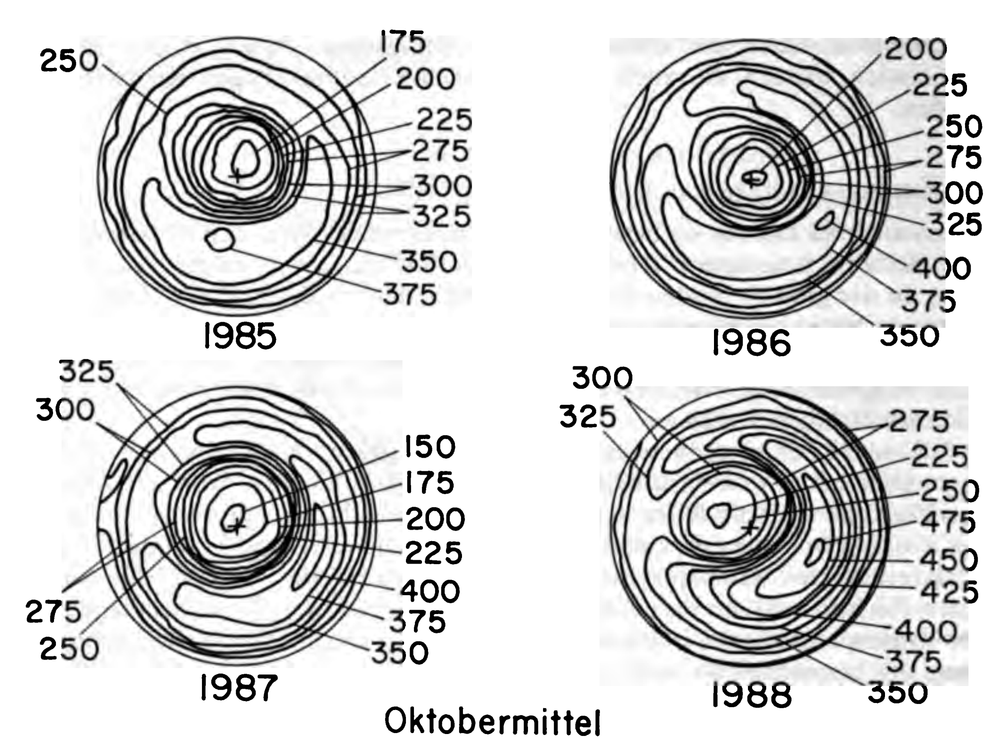


Bild 11 Schwankung der Ozonlochintensität im zweijährigen Rhythmus. +: Südpol, Umkreis: 20° S. Nach R.S. Stolanski, persönliche Mitteilung.

Fig. 11 Variation of the intensity of the ozone hole with the biennial cycle. +: Southpole, circumcircle at 20° S. R.S. Stolanski, personal communication.

seine an Ozon verarmte Luft mit derjenigen der Umgebung, was dort zu Ozonabnahme führen muss. Wegen der Erosionsvorgänge am Rande des Wirbels findet eine – allerdings geringere – Auswirkung nach aussen schon während der Ozonlochbildung statt.

Durch die Messergebnisse des Satelliten Nimbus 7 werden diese Verhältnisse klar bestätigt. Von 1978 bis 1987 (Ozone Trend Panel, 1988) hat der mittlere Ozongehalt im subpolaren Gebiet (53–65° S) im Jahresmittel um über 10% und noch in mittleren Breiten (39–53° S) um 5% abgenommen.

3.7 Die Verhältnisse in der Arktis

Infolge der intensiveren meridionalen Austauschvorgänge durch planetare Wellen fliesst in der Nordhemisphäre ein kräftigerer Wärmestrom polwärts, so dass die untere Stratosphäre am Ende der Polarnacht im Mittel gut 10 Grad wärmer ist als über der Antarktis, womit die Voraussetzungen für

PSC-Bildung und damit heterogene chemische Prozesse zunächst nicht gegeben sind. Immerhin werden auch im arktischen Bereich kleinräumig und vorübergehend −80 °C erreicht, und PSC-Bildung wird deshalb, wenn auch seltener, regional beobachtet. Durch die aktive nordhemisphärische Zirkulation werden solche «kleineren Retorten» immer relativ rasch wieder aufgebrochen. Es ist möglich, aber keineswegs gesichert, dass es hier zu einem Ozonabbau kommt, der einen – negativen – Beitrag zum nordhemisphärischen Ozonbudget liefert. Messungen von OClO in Thule, Grönland (76,5° N) (G.H. Mount et al., 1988) zeigten einen gegenüber normalen Verhältnissen erhöhten OClO-Wert – was auch übernormales aktives Chlor bedeutet –, der aber doch etwa 8mal niedriger war als in der Antarktis. Die für den Winter 1988/89 geplante internationale arktische Ozonexpedition sollte – vor allem auch durch Spurengasmessungen – vermehrte Einsichten in dieses Problem bringen.

4 Folgen und Massnahmen

4.1 Globale Ozonverminderung

Der Schock, der durch die Entdeckung des Ozonlochs und seine Erklärung als Folge des steigenden CFC-Gehalts der Atmosphäre ausgelöst wurde, hat erneut die Dringlichkeit einer vollen Abklärung der vorher etwas verdrängten CFC-Problematik sowie von Massnahmen ins Gedächtnis gerufen. Die sorgfältige Untersuchung und Korrektur (für die Folgen einer Instrumentendrift) der Gesamtozondaten des Forschungssatelliten Nimbus 7, der seit Ende Oktober 1978 ununterbrochen die Ozonschicht überwacht, hat in 9 Jahren auch ausserhalb des eindeutig von der Ozonlochbildung beeinflussten Gebietes südlich von 40° S einen negativen Trend von gut 2% festgestellt (Ozone Trend Panel, 1988), der kaum auf eine Veränderung der Zirkulation (verminderter polwärts gerichteter Ozontransport) zurückgeführt werden kann, da die Abnahme im tropischen Quellgebiet in der Nordhemisphäre grösser ist als in höheren Breiten. Die betrachtete Abnahme ist grösser als der von den Modellen mit «normaler» Photochemie global vorhergesagte Verlust (vgl. Bild 5b), wenn auch wohl noch im Streubereich der Prognosen. Es stellt sich die Frage, ob noch nicht berücksichtigte, zum Ozonabbau beitragende Vorgänge vorhanden sind – ob z. B. gewisse heterogene Reaktionen, wie sie zur Bildung des Ozonlochs führen, auch bei höheren Temperaturen eine Rolle spielen könnten. Der Ozoneinbruch im grössten Teil der Nordhemisphäre nach der Eruption des El Chichon (April 1982) – könnte ein Fingerzeig in dieser Richtung sein – lag doch der stärkste Ozonrückgang genau im Niveau des Aerosolmaximums (H. U. Dütsch, 1984). Neueste Laboratoriumsmessungen (M. A. Tolbert et al., 1988b) haben nun tatsächlich den Ablauf der heterogenen Reaktionen (32 und 33) an der Oberfläche von mit etwa ⅓ Wasser verdünnten S[illegible] säuretröpfchen gezeigt, wie sie die globale Aerosolschicht [illegible]

Höhe bilden und wie sie auch einen Hauptanteil des erwähnten vulkanischen Aerosols darstellten. Es muss also befürchtet werden, dass das Problem, auch abgesehen von der Ozonlochbildung, schwerwiegender ist als zeitweise angenommen wurde.

4.2 Folgen einer Veränderung der Ozonschicht

Eine Abnahme des Gesamtozonschildes der Erde hat eine Erhöhung der biologisch wirksamen UV-B-Strahlung, und zwar um etwa 2% pro Prozent Ozonverlust, zur Folge. Auf Grund eingehender Untersuchungen befürchtet man beim Menschen eine Erhöhung der Hautkrebsrate (um etwa 4% pro Prozent Ozonabnahme), ferner Ertragseinbussen bei gewissen empfindlichen Kulturpflanzen und eine Störung der für die Welternährung zunehmend wichtigen Nahrungsmittelkette im Meer (National Academy, Washington 1984). Zur Absorption der tödlichen UV-C-Strahlung genügt allerdings auch noch eine sehr wesentlich geschwächte Ozonschicht.

Daneben sind auch klimatische Wirkungen zu erwarten. Die bereits im Gang befindliche Veränderung der vertikalen Ozonverteilung (vgl. Bild 6) liefert einen Beitrag zur Steigerung des Treibhauseffektes, des anderen grossen, globalen Umweltproblems des kommenden Jahrhunderts – der steigende CFC-Gehalt der Atmosphäre hat übrigens an sich eine entsprechende Wirkung. Es muss auch die Frage geklärt werden, ob die Behinderung der Phytoplanktonassimilation im Meer durch steigende UV-B-Belastung zu einer Verschiebung des CO_2-Gleichgewichts zwischen Meer und Atmosphäre und damit zu einer Beschleunigung des atmosphärischen CO_2-Anstieges führen könnte, was die Treibhausproblematik weiter verschärfen würde. Wegen der Koppelung der Stratosphärentemperatur mit der Ozonkonzentration wird durch Veränderungen in der Ozonschicht auch die stratosphärische Zirkulation beeinflusst – die Verstärkung des antarktischen Zirkumpolarwirbels in den letzten Jahren ist ein drastisches Beispiel dafür. Wie weit dies auf die Troposphäre zurückwirken würde, ist noch wenig geklärt.

4.3 Massnahmen

Der Ozonlochschock hat im Protokoll von Montreal (1987) zu einer internationalen Vereinbarung über eine Halbierung der CFC-Produktion in den nächsten 10 Jahren geführt, nachdem vorher nur einzelne Länder, darunter allerdings der grösste Verbraucher, die USA, sektorielle Vorschriften erlassen hatten – nämlich ein Verbot der Verwendung in Spraydosen. Der Verbrauch war dadurch zwar vorübergehend gesunken, hatte aber in den letzten Jahren wieder zugenommen, da die übrigen Anwendungen (Kühlaggregate, Blasen von Schaumstoffen und schlieslich auch als Lösungs- und Reinigungsmittel) überproportional angestiegen waren.

Neben dem weltweiten CFC-Spraydosenverbot ist nun vorgesehen, dass die vollchlorierten CFC in Kühlaggregaten durch wasserstoffhaltige Verbindungen (z. B. $CHClF_2$, F_{22} und ähnliche) ersetzt werden. Da diese mit OH-Radikalen reagieren, beginnt der Abbau in der Troposphäre (das hier entstehende HCl wird ausgewaschen), und nur ein relativ kleiner Anteil gelangt in die Stratosphäre, wo er ozonwirksam wird. Das Ozonzerstörungspotential von F_{22} wird auf nur 5% desjenigen der vollchlorierten Substanzen veranschlagt (diese Zahl ist zwar noch umstritten). Parallel dazu wird Entsorgung eingesetzt: Bei Revisionen von Grossanlagen soll die Kühlsubstanz zurückgewonnen werden usw. Bei der Herstellung von Schaumstoffen soll auf andere Gase umgestellt werden, oder es soll ungeschäumter Kunststoff mit wabenförmig verteilten evakuierten Zellen als Isolationsmaterial eingesetzt werden.

Da auch bei einem momentanen Abbruch des CFC-Ausstosses in die Atmosphäre die Ozonwirksamkeit noch etwa 10 Jahre steigen würde – weil noch längst kein Gleichgewicht zwischen troposphärischem und stratosphärischem Gehalt besteht –, müssen die vorgesehenen Massnahmen als bedenklich langsam und auf längere Sicht ungenügend betrachtet werden. Man kann aber hoffen, dass, nachdem sich die Industrie nun in Ersatztechnologie engagiert hat, die Bestrebungen zum Schutz der Ozonschicht eine Eigendynamik erhalten, so dass eine baldige Verschärfung des Protokolls von Montreal keine grösseren Schwierigkeiten mehr bereiten sollte.

Als erstes bindendes internationales Abkommen gegen die Folgen der globalen Luftverschmutzung ist das Protokoll von Montreal auf alle Fälle bedeutungsvoll: Vielleicht darf man nun doch hoffen, dass auch Massnahmen gegen das andere schwerwiegende globale Problem – Zunahme des Treibhauseffekts – noch rechtzeitig in Angriff genommen werden, obschon ihre Durchführung ungleich schwieriger ist.

5 Literatur

Anderson G. J., Brune W. H., Proffit M. J., Starr W., Starr K. R. and Chan K. R. (1988): In situ observation of ClO in the Antarctic: Evidence for chlorine catalyzed destruction of ozone. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 143–146.

Chapman S. (1930): A theory of upper atmospheric ozone. Mem. Roy. Met. Soc. 3, 103–125.

Crutzen P. J. and Arnold F. (1986): Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic Stratosphere – a major cause for the spring time ozone hole. Nature *324*, 651–655.

Crutzen P. J. (1987): Ozonloch und Spurengase – Menschliche Einflüsse auf Klima und Chemie der Atmosphäre. Max-Plank-Gesellschaft, Jahrbuch 1987, 27–40.

Dütsch H. U. (1980): Ozon in der Atmosphäre – Gefährdet die Stratosphärenverschmutzung die Ozonschicht. Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Zürich.

Dütsch H. U. (1984): Total ozone trend in the light of ozone soundings, the impact of El Chichon. Atmospheric Ozone, Proceedings of the Ozone Symposium Halkidike, Greece, 3–7 Sept. 1984, Reidl Publ. Co. 263–268.

Fahey D. W., Murphy D. M., Eubank C. S., Ferry G. V., Chan K. R. and Ko M. K.-W. (1988): Measurements of NO and total reactive odd nitrogen, NOy; in the Antarctic stratosphere. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 147–148.

Farman J.C., Gardiner B.G. and Shanklin J.D. (1988): Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_X/NO_X interaction. Nature *315*, 207–210.

Hofman D.J., Rosen J.M. and Harder J.W. (1988): Aerosol measurements in the winter/spring Antarctic stratosphere 2. Impact on polar stratospheric cloud theories. J. Geophys. Res. *93*, 677–686.

Komhyr W.D., Grass R.D. and Leonard R.K. (1986): Total ozone decrease at South Pole, Antarctica 1964–1985. Geophys. Res. Lett. *13*/12, 1248–1251.

Leu M.-T. (1988): Laboratory studies of sticking coefficients and heterogeneous reactions important in the Antarctic stratosphere. Geophys. Res. Lett. *15*/1, 17–20.

McElroy M.B., Salawitch R.J., Wofsy S.C. and Logan J.A. (1986): Reduction of Antarctic ozone due to synergistic interactions of chlorine and bromine. Nature *321*, 759–762.

McIntyre M. (1988): Polar vortex dynamics. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 221–223.

Molina M.J. (1988): The rates and mechanisms of several reactions believed to be important for ozone depleation in the Antarctic stratosphere. Proceedings of Quadrennial Ozone Symposium, Göttingen 8–13 Aug. 1988. To appear.

Molina M.J. and Rowland F.S. (1974): Stratospheric sink for chlorofluoromethans: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone. Nature *249*, 810–814.

Molina M.J., Tso R.-L. and Wang F.C.-W. (1988): Chemistry of chlorinated spheries in the antarctic stratosphere. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 251–252.

Mount G.H., Sanders W., Iukoubek R.O., Schmeltekopf A.L. and Susan Solomon (1988): Visible and near-ultraviolet-spectroscopy at Thule Air Force Base 76.5° N from January 28 to February 15, 1988. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 191–192.

National Academy, Washington (1984): Causes and effects of changes in the ozone layer. Stratospheric Ozone, Up date 1983, 254 pp.

Ozone Trend Panel (1988): Executive Summary.

Poole L.R. and McCormick M.P. (1988): Polar stratospheric clouds and the Antarctic ozone hole. J. Geophys. Res., in press.

Poole L.R., McCormick M.P., Brown E.V., Fakey D.W., Kelly K.K., Flory G.V., Puschel R. and Jones R.L. (1988): Extinction and back scatter measurements of Antarctic PSC's 1987. Implication for particle and vapour removal. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 77–79.

Sanders R.W., Solomon S., Carroll M.A. and Schmeltekopf A.M. (1988): Ground based measurements of O_3, No_2, OClO and BrO during the 1987 Antarctic ozone depletion event. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 115.

Solomon S., Mount G.H., Sanders R.W. and Schmeltekopf A.L. (1987): Visible spectroscopy at McMurdo station, Antarctica 2, Observations of OClO. J. Geophys. Res. *92*, D7, 8329–8338.

Stolarski R.S., Krueger A.J., Schoeberl M.R., McPeters R.O., Newman P.A. and Alpert J.C. (1986): Nimbus 7 satellite measurements of the spring time Antarctic ozone decrease. Nature *322*, 808–811.

Tolbert M.A., Rossi M.J. and Golden B.M. (1988a): Heterogeneous chemistry related to Antarctic depletion. Reaction of $ClONO_2$ and N_2O_5 on ice surfaces. NASA, Polar Ozone Workshop, Abstracts 95–97.

Tolbert M.A., Rossi M.J. and Golden D.M. (1988b): Heterogenous interactions of Chlorine hydrate, hydrogene chloride and nitric acid sulfuric acid surfaces at stratospheric temperatures. Geophys. Res. Lett. *15*/8, 847–850.

World Meteorological Organization (1981): The stratosphere 1981, theory and measurements. WMO Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 11.

World Meteorological Organization (1985): Atmospheric Ozone 1985. WMO Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 16.

Prof. Dr. Hans U. Dütsch, Kantstrasse 14, 8044 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/1: 109–138

Neue Floren- und Faunenfunde aus der Oberen Süsswassermolasse des Hörnligebietes (Ostschweiz)

Thomas Bolliger und Mark Eberhard, ETH Zürich

Die Molasse des Hörnli wurde schon verschiedentlich zu gliedern versucht, was aber nicht befriedigend gelang.

Paläontologische Objekte blieben immer Zufallsfunde. M. Weidmann (Jongny VD) hatte 1986 erfolgreich einige Fundstellen beprobt. Eine gegenwärtige systematische Bearbeitung des Gebietes liess verschiedentlich Mollusken, Kleinsäugerzähnchen, Holz-, Blatt-, Frucht- und Samenreste auffinden. Die Ausbeute an Säugerfunden ist noch spärlich.

Eine vorläufige biostratigraphische Gliederung der höchsten Hörnlischichten lässt eine Säugerzonierung (Neogene Mammal Units = MN) in MN 6–7 zu, MN 5 und MN 8 lassen sich gemäss bisherigen Erkenntnissen ausschliessen. Die Florenassoziationen deuten auf die Phytozonen OSM 3a–3b hin.

Im Leiachertobel (835 m) ergeben vorläufige Resultate eine Auenwaldvergesellschaftung eines warm-gemässigten Klimas. Am Chlihörnli (930 m) weisen Pflanzenreste, Schnecken und Ostrakoden auf einen unter 350 m gelegenen Auenbereich hin. Säugetiere und Landmollusken lebten ebenfalls in diesen Gebieten, teilweise aber auch in trockeneren, offeneren Landschaftsteilen. Klimarekonstruktionen lassen Jahresmitteltemperaturen von 15–17 °C und jährliche Regenmengen von über 1300 mm annehmen. Für den Fundpunkt auf 1000 m sind keine wesentlichen Unterschiede dieser Werte zu finden, einige Pflanzen- und Molluskenreste weisen jedoch auf eine Höhendifferenzierung hin. Eine Veränderung von einem warm-gemässigten (Leiachertobel 835 m) zu einem warm-temperierten Klima (Chlihörnli 930 m und 1000 m) zeichnet sich ab.

New Fossils from the Upper Freshwater Molasse of the Hörnli region (Eastern part of Switzerland)

The Molasse sediments of the Hörnli fan have been divided by different authors into lithologically different sequences and thus widely correlated. This artificial division is not satisfactory and of minor value due to the fast changing sedimentary conditions within fluvial deposits.

Fossils were only occassionally found. E. Letsch 1899 first described the occurrence of a thin coaly marl with fossil leaves on Chlihörnli at 930 m. In 1986 M. Weidmann (Jongny VD) successfully prepared some other dark marls for Microfossils. More recently our systematic search for fossils in that region lead to the discovery of several additional horizons in the profile.

A provisional biostratigraphy of the uppermost fossil-containing layers indicates the presence of MN 6–7. (MN means Micromammal-Unit of Neogene age.) Phytozonation indicates that OSM 3a–3b are present. The plant associations of Leiachertobel and Chlihörnli are that of modern mixed mesophytic forests. Climatically, both Chlihörnli horizons can be described as warm temperate, with a mean annual temperature of 15–17 °C and a mean annual precipitation of over 1300 mm. At Leiachertobel the provisional results indicate a slightly cooler climate. Paleotopography at Chlihörnli (930 m) was rather flat and at or lower than 350 m above sea level, whereas at Chlihörnli (1000 m) the increase of mesophytic and mountainous species indicate an accentuated paleorelief.

1. Sedimentologie (T.B.)

Das Untersuchungsgebiet betrifft die topo- wie lithostratigraphisch höchstgelegenen Schichten der flachgelagerten Oberen Süsswassermolasse des Hörnlischuttfächers. Weite Bereiche im Hörnligebiet werden von mächtigen Nagelfluhschüttungen dominiert. Diese können über 80% eines Profiles ausmachen. Die Konglomerate stellen normale Rinnensedimente oder Hochwasserablagerungen sich verlagernder Kiesflüsse dar. Diese vermochten die liegenden Ablagerungen vor allem bei Unwettern zu erodieren, so dass häufig die wenig eingeregelten Geröllfrachten solcher Ereignisse erhalten blieben. Ein davon völlig abweichender Sedimenttyp stellt eine 1,5 m mächtige, kalkig-dolomitische Feinbrekzienlage dar, die ausschliesslich im Profil Hörnli–Bärtobel auftritt. Obwohl genaue Abklärungen dazu noch ausstehen, kann vermutet werden, dass sie den Überrest eines Murgangereignisses mit lokalem Einzugsgebiet darstellt. Wenngleich sich generell die Konglomeratbänke oft unmittelbar folgen (Hörnli-Fazies-Assoziation H1, H. M. Bürgisser 1980), treten dennoch gelegentlich Mergelpartien dazwischen eingelagert auf. Diese lassen sich kaum über mehr als 1 km Distanz verfolgen. Ihre Mächtigkeit variiert von einigen dm bis 30 m. Eine einigermassen kontinuierliche Sedimentation ist nur kurzzeitig in einigen wenigen Stillwasserablagerungen repräsentiert. Lokalstratigraphisch sowie für ökologische und biostratigraphische Auswertungen sind diese oft fossilführenden Feinsedimente von grosser Wichtigkeit. Für eine generelle lithostratigraphische Einteilung des gesamten Hörnlischuttfächers eignen sie sich indessen nicht. Diverse Autoren (H. Tanner 1944, F. Hofmann 1951, U. P. Büchi 1957, J. K. A. Habicht 1987) schieden lithologische Einheiten aus, die sie über weite Teile der Hörnlischüttung korrellierten und stratigraphisch verwendeten («Konglomeratstufen», «Mergelzonen»). Diese Gliederung ist jedoch kaum durchführbar, da Mergelzonen lateral meist nach wenigen hundert Metern auskeilen. Eine generelle, weit verfolgbare «Hörnligubel-Mergelzone» beispielsweise existiert nicht. Lithologische Korrelationen haben lokalen Stellenwert. Regionale Vergleiche sind schrittweise vorzunehmen und mit Fossilassoziationen, distal zusätzlich mit Bentonit-Niveaus zu verifizieren.

Bild 1: Geographische Übersicht.

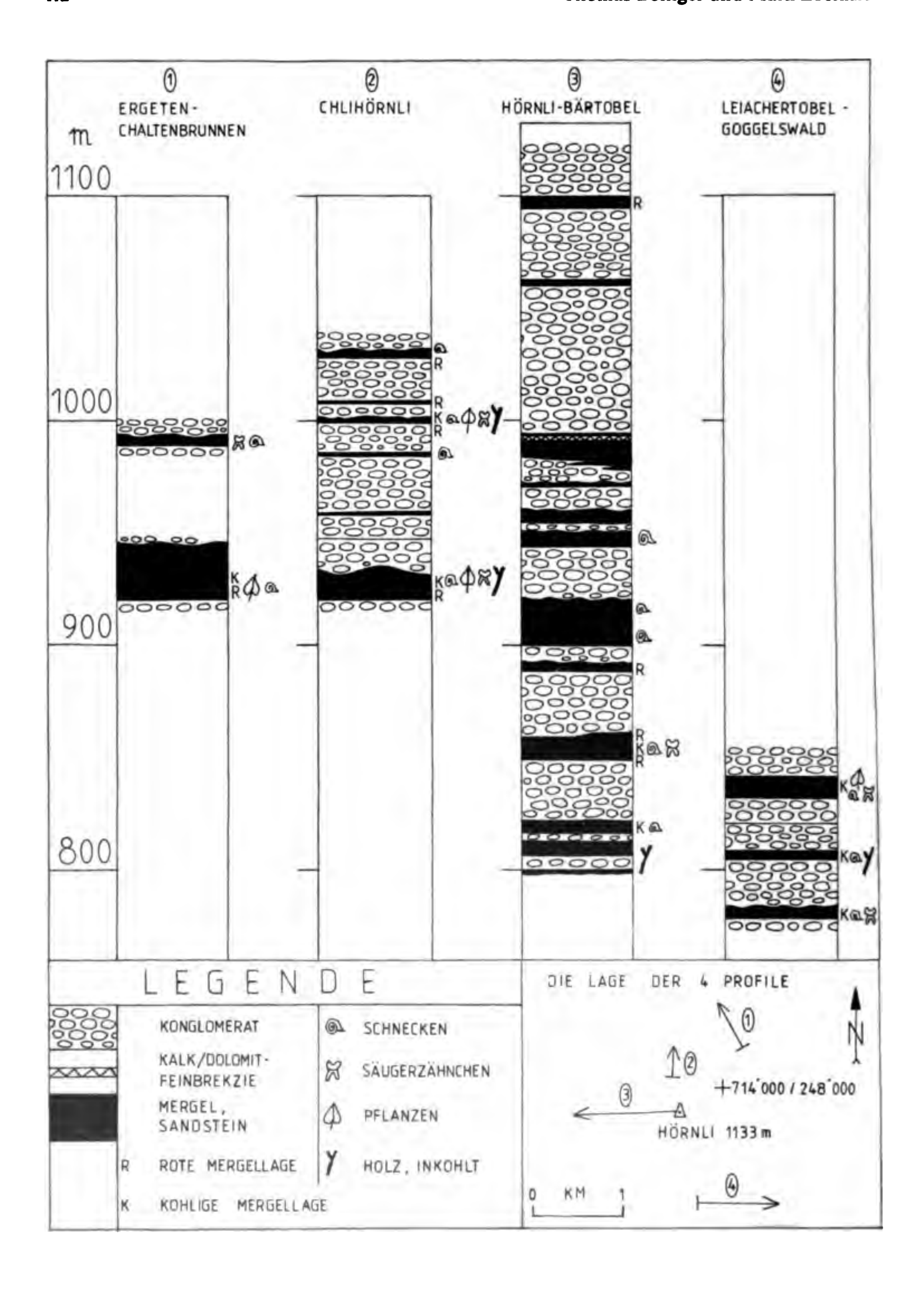
Fig. 1: Geographic setting.

An Fossilien erwähnten oben genannte Autoren nur einige wenige Molluskenreste. Bereits E. Letsch machte 1899 jedoch auf das Vorkommen eines kohligen Mergels mit Blättern am Chlihörnli auf Kote 930 m aufmerksam. Bei der Aufnahme des geologischen Kartenblattes Hörnli konnte 1967 im Leiachertobel auf 835 m ein weiterer Pflanzenhorizont gefunden werden. Bei eigenen Profilaufnahmen wurden 1987/88 zahlreiche Mergel auf ihren Fossilinhalt hin untersucht (geschlämmt). Dabei konnten Schneckenreste, gelegentlich Kleinsäugerzähnchen und, vor allem im neu entdeckten Mergelpaket auf 1000 m, Pflanzensamen gefunden werden. Herr M. Weidmann hatte die Freundlichkeit, mir seine 1986 im Hörnligebiet aufgenommenen Profile und seine Fossilfunde zukommen zu lassen. Davon waren zwei Fundstellen bemerkenswert: Ergeten (990 m) und Goggelswald (835 m). Im gesamten Profil können fossilführende Mergel angetroffen werden. Eine nennenswerte Häufung tritt nicht auf. Es soll nun ein erster Überblick über die Fossilvorkommen im Profil der höheren Hörnlischichten gegeben werden.

2. Tektonik (T.B.)

Rasche Sedimentation wurde abgelöst von Stagnation und molasseinterner Erosion. Der Ablauf solcher «Zyklen» wurde wesentlich von den klimatischen Bedingungen, der Paläogeographie und tektonischen Vorgängen im Vor- und Hinterland der Alpen beeinflusst. Wie Florenfunde belegen, hatte sich die Mittelland-Oberfläche seit der ausgehenden Oberen Meeresmolasse vor ca. 16 Ma (Ma = Millionen Jahre) bis in die jüngere Molassezeit vor 12 Ma um maximal 400 m gehoben. Bei einer Anhäufung von 1100–1300 m Sediment bis zum Hörnligipfel entspricht dies immerhin noch einer effektiven Absenkung von 700–900 m in ca. 4 Ma, was lediglich etwa 0,2 mm/Jahr, also Werten, wie sie auch heute noch vorkommen, entspricht. Es ist anzunehmen, dass diese Absenkung zusammen mit Molassesedimentation noch einige Zeit fortdauerte, ehe sich die Bewegung wieder umkehrte. Die heute höchstliegenden Hörnlischichten sind also bis auf ca. Meeresspiegel oder gar tiefer abgesenkt und in etwa 10 Ma auf 1000 m gehoben worden – mit einer Rate von rund 0,1 mm/Jahr. Es ist allerdings auch möglich, dass Absenkungen und Hebungen noch gelegentlich wechselten – natürlich mit entsprechend höheren Bewegungsraten.

Die Deformation infolge Verkürzung durch den N-S-Schub der fortschreitenden Alpenbildung hatte im zentralen Hörnligebiet nur sehr geringe Schichtverbiegungen zur Folge. Lediglich im Rechboden (Koord. 715 470/245 870/780 m) sind ein kleinerer Bruchversatz in der Nagelfluh und eine Antiklinalverbiegung in den liegenden Mergeln direkt beobachtbar. Der Hauptteil des Druckes wurde sedimentintern durch Porenverringerung und Drucklösung aufgefangen, was negative Auswirkungen auf die Erhaltung der Mollusken mit sich brachte. Gleichzeitig erhöhte sich wohl auch der heute trächtliche Inkohlungsgrad der Molassehölzer des Hörnligebiete



① ERGETEN-CHALTENBRUNNEN
② CHLIHÖRNLI
③ HÖRNLI-BÄRTOBEL
④ LEIACHERTOBEL - GOGGELSWALD
m
1100
1000
900
800
LEGENDE
KONGLOMERAT
KALK/DOLOMIT-FEINBREKZIE
MERGEL, SANDSTEIN
R ROTE MERGELLAGE
K KOHLIGE MERGELLAGE
SCHNECKEN
SÄUGERZÄHNCHEN
PFLANZEN
HOLZ, INKOHLT
DIE LAGE DER 4 PROFILE
N
+714'000 / 248'000
HÖRNLI 1133 m
0 KM 1

3. Das Molasseprofil des Hörnli (T.B.)

Drei Mergelzonen am Chlihörnli sollen hier näher vorgestellt werden:

3.1 Chlihörnli-Nordflanke 920–930 m, Chaltenbrunnen 920–945 m

Diese z. T. bis über 10 m mächtige Mergelzone lässt sich auf ca. 700 m Länge verfolgen. Die Fundschicht bildet ein bis 50 cm mächtiger, kohliger Mergel, aus dem verschiedene Schnecken und einige wenige Säugerzähnchen geborgen werden konnten. Darüber folgt eine 1 m mächtige, feinsandig-mergelige Sedimentlage, die basal zahlreiche, z. T. gut erhaltene Blatt- und Fruchtreste enthält. Laminationen, Schrägschichtungen und Slumps kennzeichnen dieses Sediment eines Flussuferbereiches. Eine lithostratigraphische Position von rund 550–600 m über dem «Hüllistein-Niveau», einem Leithorizont der Hörnlimolasse, kann vermutet werden.

3.2 Ergeten 990 m

Diese von M. Weidmann erstmals beprobte, nur wenige Meter mächtige Mergelzone ist durch rötlich-beige bis graue Sedimente gekennzeichnet. Aus dem oberen Teil lassen sich Kleinsäugerzähnchen gewinnen. Die Ausbeute von 1–2 Zähnchen pro 7–10 kg Sediment muss für hiesige Verhältnisse bereits als günstig angesehen werden. Auffallend ist an dieser Fundstelle die Abwesenheit organischen Kohlenstoffes, weshalb die Zähnchen in hellgelber Farbe vorliegen (untypisch für Molassefundstellen).

3.3 Chlihörnli 1000 m

Diese Fundstelle konnte 1987 entdeckt werden. Der Mergelkomplex ist auf etwas mehr als 100 m Länge in fünf kleinen Erosionsrinnen aufgeschlossen. Die Hauptfundschicht, ein kohliger Mergel, setzt dabei mehrmals aus. Nebst Schneckenresten, Blattresten, inkohltem Holz und einigen Wirbeltierfossilien zeichnen sich die Mergel vor allem durch das zahlreiche Vorkommen von Frucht- und Samenresten aus.

◀ Bild 2: 4 Molasseprofile aus der jüngsten Hörnli-Molasse.

Fig. 2: Four profiles of the youngest Hörnli-Molasse.

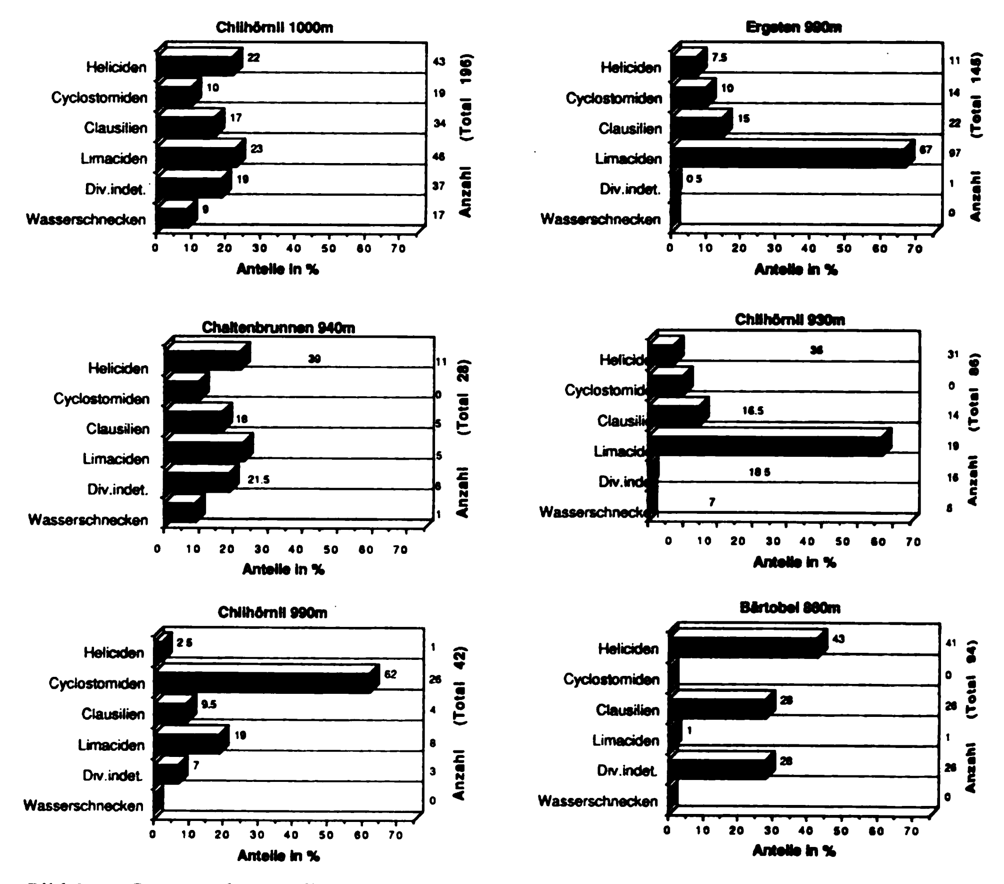


Bild 3: Gastropodenverteilung an 6 Fundstellen.

Fig. 3: Distribution of gastropod groups at 6 outcrops.

4. Die Tierfossilien (T.B.)[1]

4.1 Mollusken

Die Molluskenfauna (Gastropoden) lässt sich in verschiedene Genera mit unterschiedlichen Habitatsansprüchen gliedern. Heliciden treten fast überall auf. Häufig sind ferner Clausilien, Cyclostomiden und Nacktschneckenarten. Die übrigen Gastropoden, vor allem limnisch-fluviale, treten meist stark zurück oder fehlen. Wasserschnecken *(Ancylus, Limnaeus, Planorbis)* fanden sich nur an vier Stellen. Davon sind drei gleichzeitig wichtige Pflanzenfundpunkte. Verlassene Flussarme bildeten hier das Ablagerungsmilieu.

[1] Die wichtigsten Vorkommen finden sich in Tabelle 1 aufgelistet.

Die Verteilung der Landschnecken lässt auf die Ökologie der mehr oder weniger unmittelbar umgebenden Landschaft schliessen: Clausilien und Cyclostomiden bevorzugen eher trockene Habitate, Limaciden eher feuchte Gebiete. Heliciden sind äusserst anpassungsfähig und wenig spezifisch.

Aufgrund der Schnecken scheint die Fundstelle Ergeten 990 m am besten mit dem Mergel von 1000 m im Chlihörnliprofil korrelierbar zu sein, was aber nicht gesichert ist. Ebenso offen ist die Frage, ob die Schneckenverteilungen klimastratigraphische Tendenzen repräsentieren oder topographisch-regionale Unterschiede diese Effekte dominieren.

4.2 Wirbeltiere

An Reptilien fanden sich wenige Ophisaurusreste (Knochenplättchen einer schneckenfressenden Echse) sowie ein Schlangenwirbel. Fischzähnchen und Otolithen (Gehörsteinchen von Fischen) konnten noch keine gefunden werden.

Die Säugetiere sind bisher mit 32 Backenzähnchen von neun verschiedenen Fundstellen repräsentiert. Lediglich bei Goggelswald 835 m, Bärtobel 860 m, Ergeten 990 m und evtl. Chlihörnli 930 m könnten sich weitere Probenahmen lohnen.

Vom Chlihörnli und von Ergeten, auf 990–1000 m, fanden sich bisher *Anomalomys gaudryi, Eomuscardinus* cf. *sansanienis, Democricetodon* cf. *brevis, Keramidomys* sp. und *Spermophilinus* sp. sowie ein nicht näher bestimmter Soriciden-Zahn. Stratigraphisch wichtig sind *Anomalomys gaudryi* und *Eomuscardinus* cf. *sansaniensis,* beide von MN 6–8 bekannt. Der Zahn der erstgenannten Art ist tief abgekaut und lingual nachträglich anerodiert worden (Bild 4). Grössenmässig liegt er eher im unteren Variationsbereich der Art von Anwil BL, womit MN 8 unwahrscheinlich wird. Die beiden Zähne des Gliriden *Eomuscardinus* cf. *sansaniensis* sind etwas grösser als der Durchschnitt der Typusform von Sansan/F. Fraglich bleibt ferner ein einzelner Eomyiden-Zahn (Bild 4), der längenmässig und morphologisch zu *Keramidomys carpathicus* zu stellen wäre, aber eine abnormal grosse Zahnbreite aufweist, weshalb hier keine Artzuordnung erfolgte.

Die Faunenliste vom Chlihörnli auf 930 m ist noch gering: Sie umfasst erst den Hamstervertreter *Eumyarion* sp., den Schläfer *Bransatoglis* cf. *astaracensis* und einen auffällig kleinen Heterosoriciden (Insektenfresser). Vom Bärtobel auf 860 m fanden sich zwei kleine Hamster *Megacricetodon* sp. und *Democricetodon* cf. *brevis* sowie das Hörnchen *Blackia* cf. *miocaenica.* Sie alle lassen keine weiteren stratigraphischen Aussagen zu.

Etwas besser war die Ausbeute der beiden benachbarten Fundstellen Leiachertobel und Goggelswald auf 835 m, wo Soriciden, Erinaceiden und weitere, nicht näher bestimmte Insektenfresser-Zahnreste recht häufig zu sein scheinen. *Megacricetodon* cf. *similis,* ein kleiner Hamster; *Cricetodon* cf. *sansaniensis,* ein grosser Hamster, und *Microdyromys* cf. *koenigswaldi,* ein kleiner

Schläfer, bilden hier die bisherigen Nagerfunde. Der stark korrodierte Zahn von *Cricetodon* cf. *sansaniensis*, der jedoch nur gering abgekaut ist, weist etwas grössere Dimensionen auf als der Durchschnitt der Zähne der Fundstelle Rümikon bei Winterthur ZH. Morphologisch zeigt sich jedoch eine sehr gute Übereinstimmung.

Es fällt auf, dass sich viele Zähne nicht vorbehaltlos einer bekannten Art zuordnen lassen, weshalb die Bestimmungen sehr vorsichtig formuliert sind.

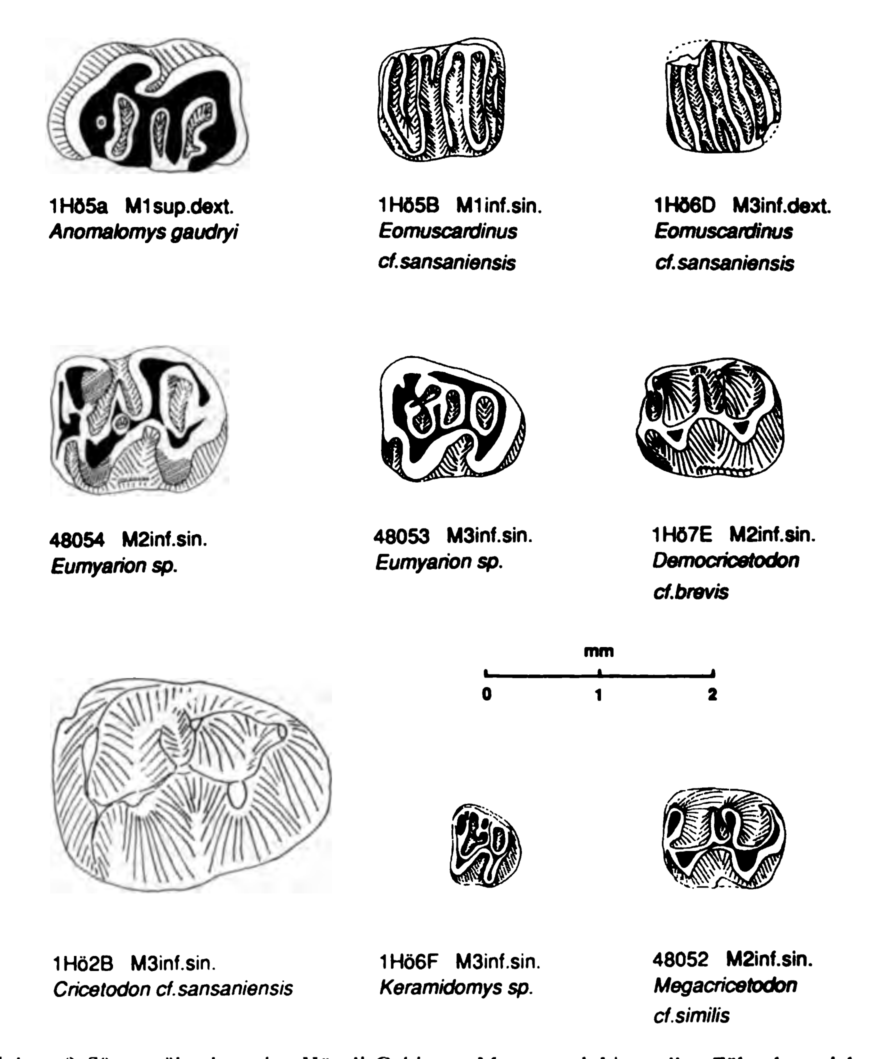


Bild 4: 9 Säugerzähnchen des Hörnli-Gebietes. Masse und Liste aller Zähnchen siehe Tabelle 3.

Fig. 4: Nine Micro-mammal teeth from the Hörnli region. For a complete list see table 3.

ɩ Feststellungen und Interpretationen

Grössere Säugerzähnchen sind selten oder fehlen: sedimentologische und/ oder ökologische Ursachen kommen in Betracht.
Es liegen erst wenige stratigraphisch aussagekräftige Arten vor.
Auffällig, aber wohl zufällig, ist die Häufung von M 2 und M 3 (zweite und dritte Molaren) bei den Cricetiden. Weil die diagnostisch wichtigen M 1 vorderhand noch fehlen, sind die Artbestimmungen der Hamster noch provisorisch. Zahlreiche der bisher gefundenen Zähnchen lassen sich nicht ohne weiteres gängigen Arten zuordnen. Dazu ist dringend mehr Material erforderlich.
Interessant ist die hellgelbe Färbung der Zähnchen von Ergeten 990 m. Die sonst in der Molasse immer vorhandenen imprägnierenden organischen Substanzen fehlen hier offensichtlich.
Die Biostratigraphie mittels Säugerzähnchen steht am Hörnli noch in ihren Anfängen. Diese in Zukunft in wesentlich engere Zeiträume gliedern zu können, ist nur eine Frage der verarbeiteten Sedimentmengen.
Für die Hörnlischichten um 990 m und 1000 m scheint eine Einstufung in MN 7 oder MN 6–7 als gerechtfertigt. Vor allem wenn man die Florenvergesellschaftung mitberücksichtigt, scheidet eine Einstufung in MN 8 aus. In den darüber verbleibenden 130 m Sediment des Hörnli ist das Auftreten von MN 8 wegen der offensichtlich schnellen Sedimentation nicht zu erwarten. Sedimentationslücken von Jahrmillionengrösse zeichnen sich nirgends ab. Die Mergelzone am Chlihörnli auf 930 m könnte im Übergangsbereich MN 6/7 liegen. Die Fossilien der tiefer liegenden Fundhorizonte deuten schliesslich ganz auf MN 6. Wie weit sich diese Einstufung auch mit dem vorhandenen Floreninhalt der tieferen Pflanzenfund-Niveaus vereinbaren lässt (z. B. Leiachertobel 835 m), bleibt noch abzuklären.
Die bisherigen Säugerfunde lassen also nur vage MN-Zuordnungen zu. Von einer genauen Datierung sind wir noch weit entfernt. Daher sind auch die Hochrechnungen der Absenkungs- und Hebungsraten spekulativ (Kapitel 2).

Paläobotanik (M.E.)

1 Übersicht

ie aus sieben feinklastischen Horizonten (Bild 5) geborgenen Pflanzenfossi-
:n werden in Tab. 4 zusammenfassend aufgeführt. Von den Fundpunkten hlihörnli 930 m und 1000 m konnten so viele Pflanzenreste bearbeitet wer-
:n, dass stratigraphische, klimatische und ökologisch-paläoorographische ussagen dieser Fundpunkte gemacht werden können. Von den restlichen ındpunkten liegen für zuverlässige Aussagen noch zu wenig Fossilreste vor. otzdem wird der Horizont Leiachertobel 835 m im Anschluss an die beiden

umfangreicheren Fundpunkte kurz vorgestellt. An Florenelementen wurden Blatt-, Frucht- und Samenreste sowie Megasporen ausgewertet.

5.2 Stratigraphie

5.2.1 Chlihörnli 930 m

Von den am Chlihörnli 930 m geborgenen Pflanzenresten ist die Kombination folgender Elemente von einigem stratigraphischen Aussagewert. Es sind dies: *Cinnamomum polymorphum* (Campherbaum), *Daphnogene lanceolata* (Lorbeergewächs), *Persea princeps* (Avocado), *Liquidambar europaea* (Amberbaum), *Platanus aceroides* (Platane).

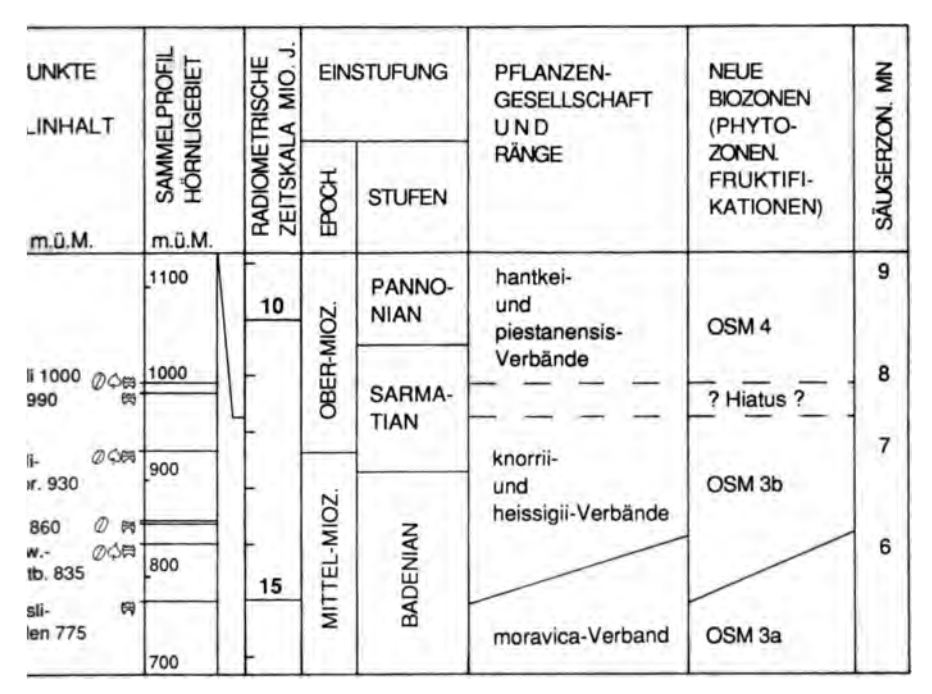
Leitfossilien im Sinne H. J. Gregors (1982a) fehlen. Sie sind wahrscheinlich auch nur für lokalstratigraphische Zwecke geeignet. *Daphnogene lanceolata* ist wie *Cinnamomum polymorphum* hauptsächlich aus der tieferen Oberen Süsswassermolasse (OSM) beschrieben worden (R. Hantke, 1984). Säugetierstratigraphisch entspräche dies der Zone MN 6, *Cinnamomum polymorphum* kommt jedoch auch in MN 7 vor. *Persea princeps* tritt bereits in MN 5–6 auf und ist in MN 7 ebenso häufig vertreten. *Liquidambar* ist bereits aus der Oberkreide bekannt. Die Form tritt auch in der Unteren Süsswassermolasse auf und kommt in den Schrotzburger Mergeln (OSM – MN 7) als *L. europaea* häufig vor. Sie wird von H.J. Gregor (1982a) aus dem knorrii- und hantkei Pflanzen-Verband beschrieben (Bild 5) und deutet somit auf die Phytozone OSM 3b hin, was der Säugerzone MN 7 entspräche. *Platanus aceroides* wird von R. Hantke (1984) der höheren OSM (MN 7) zugeordnet.

Die von H. J. Gregor (1982b) eingeführte «oide» Blatt-Typen-Einteilung ermöglicht nur bedingt weitere Aussagen über die Stratigraphie.

Bei dieser Methode wird die Morphologie eines Blattfossils grob erfasst und einem bestimmten Typ zugeordnet (z. B. cinnamomoid). Alsdann können mit der Gesamtkombination dieser Typen (z. B. cinnamomoid, populoid usw.) Aussagen über die Stratigraphie gemacht werden. Da das Klima tendenziell im Verlaufe des Tertiärs kühler wurde, kommen, je jünger die Flora ist, vermehrt arktotertiäre, native Formen vor. Dies spiegelt sich auch in der Grösse, Struktur und dem Rand eines Blattes wider. Der Hinzuzug weiterer Charakteristiken wie z. B. immergrün/sommergrün ermöglicht zusätzliche Aussagen über Ökologie und Klimatologie.

Stratigraphisch ergibt sich hierbei eine Einteilung der Flora in die Säugerzonen MN 5–8, was obigen Angaben nicht widerspricht, jedoch auch keine Einengung der Aussagen ermöglicht.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse ergibt sich für diesen Fundpunkt eine Einteilung in die Phytozonen OSM 3a–<u>3b</u>, was den Säugerzonen MN 6–<u>7</u> entspräche (Bild 5). Die unterstrichenen Zonen treffen eher zu.



Sammelprofil des Hörnligebietes mit stratigraphischem Bezug.

Stratigraphy of the Molasse in the Hörnli region.

Chlihörnli 1000 m

ir eine stratigraphische Aussage wichtige Florenzusammensetzung be- am Chlihörnli 1000 m lediglich aus *Cinnamomum polymorphum* und *ıogene lanceolata*. Wie schon im vorherigen Fundpunkt erwähnt, kom- ›eide Elemente in der tieferen (MN 6) bis in die höhere OSM (MN 7) ür eine sichere Einteilung in einen «oiden» Florentyp sind von diesem ›unkt noch zu wenig Blattfossilien erhalten. Die Kombination cinnamo- carpinoid (Ulmus-)quercoid lässt eine Einteilung ins Unter- bis Ober- n zu (MN 5–8). Eine Zuweisung in einen Florenverband (Bild 5) ist ıicht möglich.

: Vorbehalt ergibt sich somit eine Einteilung des Fundpunktes in die zonen OSM 3a–3b oder säugerstratigraphisch MN 6/7. Da der Fund- jedoch rund 70 m über dem vorhin beschriebenen liegt, ist wieder eher SM 3b/MN 7 zu schliessen.

:ima – Ökologie – Paläoorographie

er beschriebenen fossilen Formen wurden mit rezenten Vergleichsfami- ;attungen und -arten verglichen, um ihre klimatischen und ökologischen

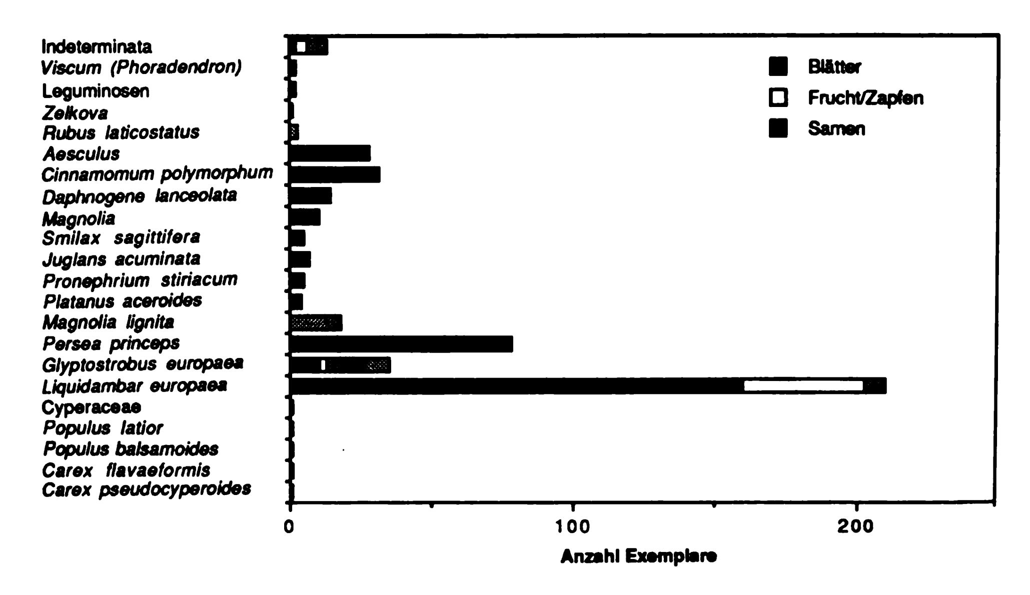


Bild 6a: Häufigkeitsverteilung der Taxa am Chlihörnli 930 m. *Carex* = Samen.

Fig. 6a: Species abundance at Chlihörnli 930 m. *Carex* = seeds.

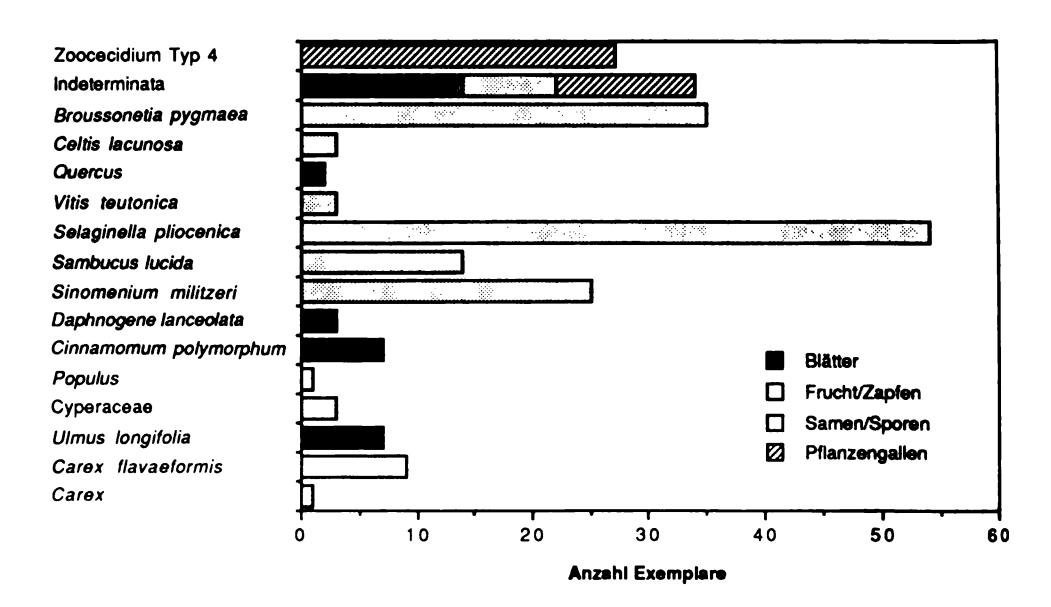


Bild 6b: Häufigkeitsverteilung der Taxa am Chlihörnli 1000 m.

Fig. 6b: Species abundance at Chlihörnli 1000 m.

Bedürfnisse sowie deren Anforderungen an Boden und Lage zu erkennen (Tab. 4). Alsdann wurde versucht, die Elemente gewissen ökologischen Räumen zuzuordnen, um abschliessend ein Paläorelief zu rekonstruieren. Die ökologische Gliederung erfolgt in Altwasser-Assoziation, Auen-, Mesophyten- und Bergwald. Die klimatischen Definitionen stützen sich auf die Arbeit von H.J. Gregor (1980).

5.3.1 Chlihörnli 930 m

Die am Chlihörnli 930 m aufgefundenen Fossilien wurden an vier verschiedenen, sich stratigraphisch entsprechenden Stellen geborgen. Hierbei liegen die drei mit Chlihörnli 930 m bezeichneten Stellen zwischen 10 und 100 m auseinander, während Chaltenbrunnen 930 m rund 700 m entfernt liegt (Bild 5). An den ersten drei Stellen konnte nun von Fundstelle zu Fundstelle eine Häufung oder ein Fehlen des einen oder anderen Pflanzenelementes festgestellt werden. Dies deutet auf ein wenig bewegtes bis stehendes Gewässer als Sedimentationsraum hin, an welchem die Standorte der verschiedenen Bäume durch ihre Blätter im Sediment direkt respäsentiert sind. Von Chaltenbrunnen wurden noch zu wenig Reste geborgen, um weitere Hinweise über diese Sachlage zu erlangen.

Rezente Vergleichstaxa lassen nun eine ökologische Gliederung erkennen (Bild 7), in welcher die Elemente des Auenwaldes, insbesondere jene des zeitweise überschwemmten Uferbereichs, betont sind (Bild 6a). Eine gewisse Häufung ist noch im ufernahen, relativ feuchten Auenbereich zu erkennen, während der Bereich des Mesophyten- bis Bergwaldes wenig bis überhaupt nicht repräsentiert ist.

Bestimmte Elemente der Flora, die heute nur unter spezifischen Klima-, Boden- und Lageverhältnissen wachsen und sich vermehren, sind wichtige Indikatoren für die Rekonstruktion der Lebensbedingungen, unter denen die Pflanzengesellschaft gedieh. *Persea princeps, Glyptostrobus europaea, Cinnamomum polymorphum* und *Liquidambar europaea* sind in diesem Fundpunkt besonders aufschlussreich.

Gesamthaft betrachtet leben ihre rezenten Vergleichsexemplare in einem Cfa-Klima mit Jahresmitteltemperaturen (JMT) zwischen 15–16 °C und jährlichen Niederschlägen (JRM) über 1300 mm (Tab. 4, Bild 9). *Liquidambar styraciflua,* die rezente Vergleichsart von *L. europaea,* kommt in ihrem Heimatland, dem atlantischen Nordamerika in Alluvialebenen nur selten über 350–400 m ü. M. vor. Da unsere fossile Flora jedoch von *Liquidambar* dominiert wird (Bild 6a), müssen ideale Lebensverhältnisse für diese Art geherrscht haben. Die oberste Vorkommensgrenze dürfte somit kaum erreicht worden sein. Eine Höhenlage der Pflanzengesellschaft von unter 350 m ist somit anzunehmen.

Die meisten Elemente der Flora sind sommergrün und können heute in einem sommergrünen Laubwald mittleren Feuchtigkeitsgrades (Mixed Mesophytic Forest – MMF) SE-Asiens oder des SE der USA gefunden werden.

Einige immergrüne und sommergrüne Elemente *(Cinnamomum, Daphnogene, Persea, Glyptostrobus)* stammen jedoch auch aus Nebelwäldern (Evergreen Broad Leaved Forests – EBLF) der erwähnten Gegenden und der atlantischen Inseln (Tab. 4).

Insgesamt kann die Florenassoziation als ein in einem warm-temperierten Klima gedeihender MMF, eines auf unter 350 m gelegenen Auenbereiches, beschrieben werden. Die häufigsten Elemente wuchsen auf einer Uferböschung, welche von gelegentlichen Hochwässern überschwemmt wurde (Bild 7).

5.3.2 Chlihörnli 1000 m

Die am Chlihörnli 1000 m aufgefundenen Pflanzenreste wurden hauptsächlich an einer Stelle geborgen. Nur die Samen von *Broussonetia pygmaea* konnten an vier, sich stratigraphisch entsprechenden, horizontal ca. 20–50 m auseinanderliegenden Stellen isoliert werden. Die Blattfossilien liegen, durch Rutschungen des noch weichen Mergels (Slumps) bedingt, teilweise verdreht oder verfaltet im Sediment. Dies erschwert ihre Bergung und Identifikation stark. Es kann ein zeitweise bewegtes Gewässer als Sedimentationsraum angenommen werden.

Rezente Vergleichstaxa lassen eine ökologische Gliederung erkennen (Bild 8). Die häufigsten Formen entstammen einem ufernahen Auenwald (Bild 6b). Relativ häufig sind aber auch Bergwaldelemente. Dem zeitweise überschwemmten Auenbereich entstammen ebenso noch einige Pflanzenreste.

Im Unterschied zum Fundpunkt 930 m liegen hier sehr viele Samenreste und sogar Megasporen vor, während die Blattreste stark zurücktreten (Bild 6b). Schön erhaltene Blattreste sind jedoch ein Indiz für die Autochthonie einer Flora, während kleinere Samenreste ohne Schaden zu nehmen über mehrere 100 m im Wasser transportiert werden können. Die Megasporen von *Selaginella*, welche an diesem Fundpunkt dominieren (Bild 6b), können, bedingt durch ihre Kleinheit (0,6–0,8 mm im Durchmesser), mit dem Wind oder Wasser sehr weit transportiert werden. Die ökologische Gliederung zeigt hier somit die Räume, in welchen die einzelnen Elemente vorkommen, jedoch von wie weit die kleinen Samenreste und Sporen (vor allem *Broussonetia* und *Selaginella*) in den Ablagerungsraum transportiert wurden, ist schwierig zu rekonstruieren.

Der eigentliche Sedimentationsraum ist durch die gut erhaltenen Blattreste dokumentiert. Hier sind für Klima-, Boden- und Lageverhältnisse vor allem *Cinnamomum polymorphum* und *Ulmus longifolia* wichtig.

C. camphora, die rezente Vergleichsart von *C. polymorphum*, fruchtet nicht unter 15 °C und hat einen Schwellenwert der jährlichen Niederschläge von 1300 mm (Tab. 4). Sie kommt in der «warm-temperate zone» Japans bis ca. 500 m ü. M. vor (M. Numata, 1974). Es sei hier allerdings erwähnt, dass *Cinnamomum camphora* als Vergleichsform für *C. polymorphum* von einigen Autoren angezweifelt wird (z. B. F. Kirchheimer, 1942, D. K. Ferguson, 1971).

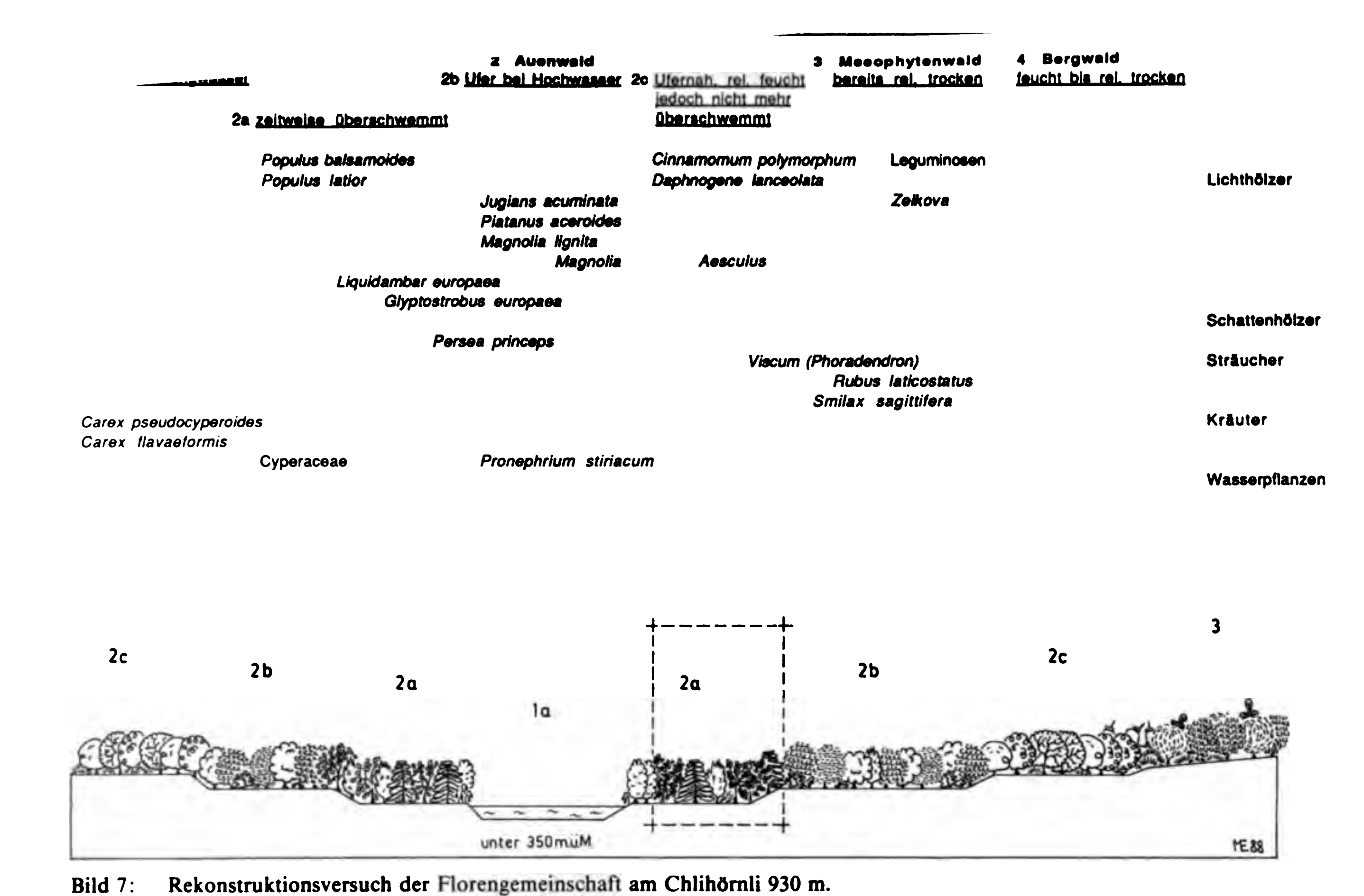


Bild 7: Rekonstruktionsversuch der Florengemeinschaft am Chlihörnli 930 m.

Fig. 7: Reconstruction of the floral communities at Chlihörnli 930 m.

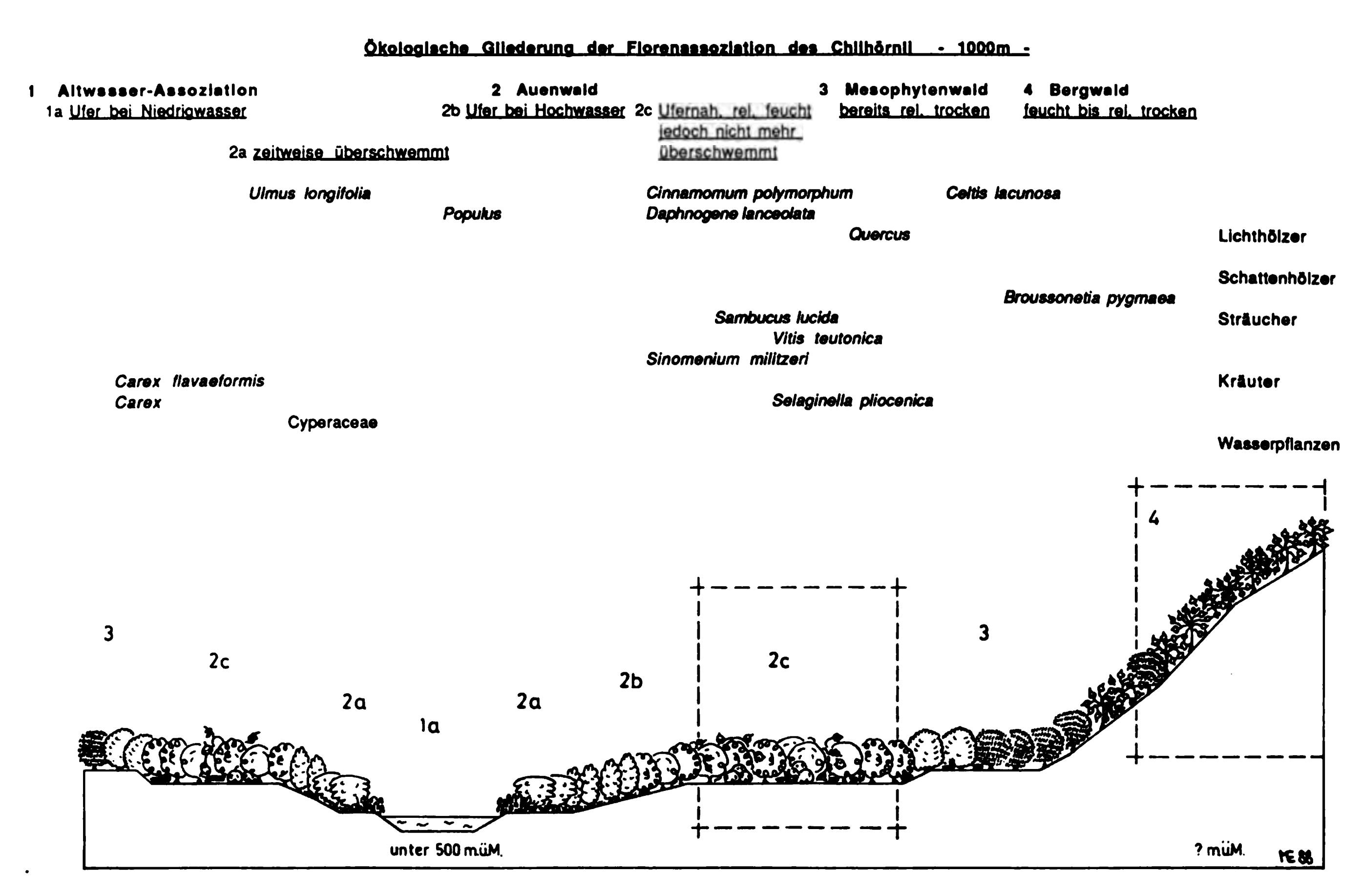


Bild 8: Rekonstruktionsversuch der Florengemeinschaft am Chlihörnli 1000 m.

Fig. 8: Reconstruction of the floral communities at Chlihörnli 1000 m.

ı Nordamerika beheimatete *Ulmus americana*, die rezente Vergleichsart *I. longifolia*, gedeiht nach R. Hantke (in T. Bolliger et al. 1988) kaum über einem Jahresmittel von 17 °C.

omenium und *Vitis*, beides Schlinggewächse, sowie *Sambucus*, *Carex* ie übrigen Cyperaceae können dem eigentlichen Ablagerungsraum zunet werden. Eine geringfügige Verschwemmung ist jedoch anzunehmen. *inella* gehört ebenso in diesen Sedimentationsraum, jedoch ist nicht , von wie weit sie eingeweht oder eingeschwemmt wurde. *Celtis lacu-* deren kalkige Samenschalen gegen Transportschäden sehr resistent kann ebenso in diesem Ablagerungsraum gestanden haben, doch bevor- *Celtis* eher etwas trockenere, leicht höher gelegene Standorte. Eine Einmmung aus solchen vom Grundwasserspiegel isolierten Lagen ist zu .ten.

gesamt kann man mit diesen Elementen unter Berücksichtigung der naıen Vorkommen und dem Immergrün/sommergrün-Verhältnis wiedernen auf unter 500 m gelegenen MMF eines Auenbereiches erkennen. äufigsten Elemente entstammen einem vom Hochwasser nicht mehr :hwemmten Uferbereich. Klimatisch ergibt sich eine JMT von 15 bis tens 17 °C und eine JRM von über 1300 mm (Bild 9).

ıussonetia kazinoki, die rezente Vergleichsart von *B. pygmaea*, gedeiht in China, Korea und Japan in Nebelwäldern (EBLF) bergiger Gegenhre kleinen Samen (1–2 mm im Durchmesser) konnten aus diesem Fundsehr häufig geborgen werden. Diese Samen müssen somit von höher ge- :n Hanglagen in den eigentlichen Sedimentationsraum eingeschwemmt n sein. Es lässt sich somit mit den vorliegenden Pflanzenfossilien ein ; Paläorelief erkennen. In den tieferen Lagen haben wir den eigent- Sedimentationsraum durch einen MMF dokumentiert, der in einem temperierten Klima gedieh. Die vom Grundwasser isolierten Hanglassen einen feuchten EBLF erkennen (Bild 8).

ren zu Bild 7 und 8

		Sträucher	Kräuter
;	Liquidambar	Viscum	Carex
netia	Magnolia	Rubus	Cyperaceae
	Persea	Sambucus	Pronephrium
ımum	Platanus	Sinomenium	Selaginella
ene	Populus	Smilax	
obus	Quercus	Vitis	
	Ulmus	In der Häufigkeitsverteilung der Elemente betont	
ose	Zelkova		

5.3.3 Leiachertobel 835 m

Der Fundpunkt im Leiachertobel liegt rund 100 m unterhalb Chlihörnli 930 m (Bild 5).

Erste Beprobungen ergaben eine Flora mit: *Typha latissima* (29), *Fagus* cf. *stuxbergi* (25), *Salix angusta* (13/5), Cyperaceae (5), alles Blattreste ausser 5 *Salix*-Samen und einem Flügel ohne Samen von *Picea* (1). Die in Klammern gesetzten Nummern sind absolute Zahlenangaben. Es zeigt sich somit, dass wir es im jetzigen Zeitpunkt der Untersuchung mit einer sehr artenarmen Flora zu tun haben. Dies kann sich bei vermehrter Probenentnahme oder an einer anderen Stelle des gleichen Horizontes ändern (vgl. Chlihörnli 930 m). Eine Häufung der beschriebenen Reste an dieser Fundstelle oder die noch dürftige Probenentnahme können somit der Grund für die Artenarmut sein.

Eine stratigraphische Einteilung ist im jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Über Klima, Ökologie und Paläoorographie lässt sich vorläufig folgendes sagen:

Die bis jetzt aufgefundenen Reste weisen auf einen sommergrünen Auenwald hin, der unter einem warm-gemässigten Klima gedieh (Bild 9). *Typha* weist gegen das offene Wasser hin, während Elemente wie *Salix* und die Cyperaceae auf feuchten, teilweise überschwemmten Böden stehen. *Fagus* und *Picea* wiederum ertragen auch etwas trockenere Böden. Paläotropisch exotische Elemente wie *Cinnamomum, Persea, Glyptostrobus,* welche auf ein warmtemperiertes bis subtropisches Klima hindeuten, fehlen bis jetzt.

Wie hoch der Sedimentationsraum lag, ist noch nicht zu erkennen.

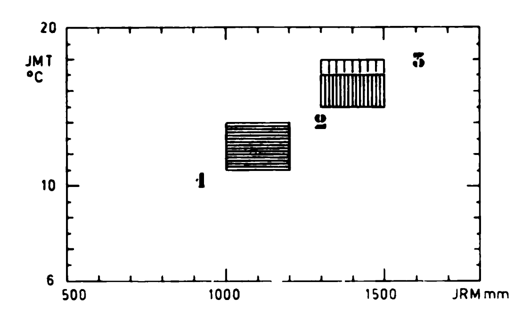


Bild 9: Übersicht über den Klimacharakter der 3 umfangreichsten Fundpunkte 1) Leiachertobel 835 m, 2) Chlihörnli 930 m und 3) Chlihörnli 1000 m. Bei 1) ist das eingezeichnete Feld als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen zu verstehen, während die Angaben 2) und 3) im JRM-Bereich nach rechts noch genauer untersucht werden müssen. JMR = Jährliche Regenmenge/JMT = Jahresmitteltemperatur.

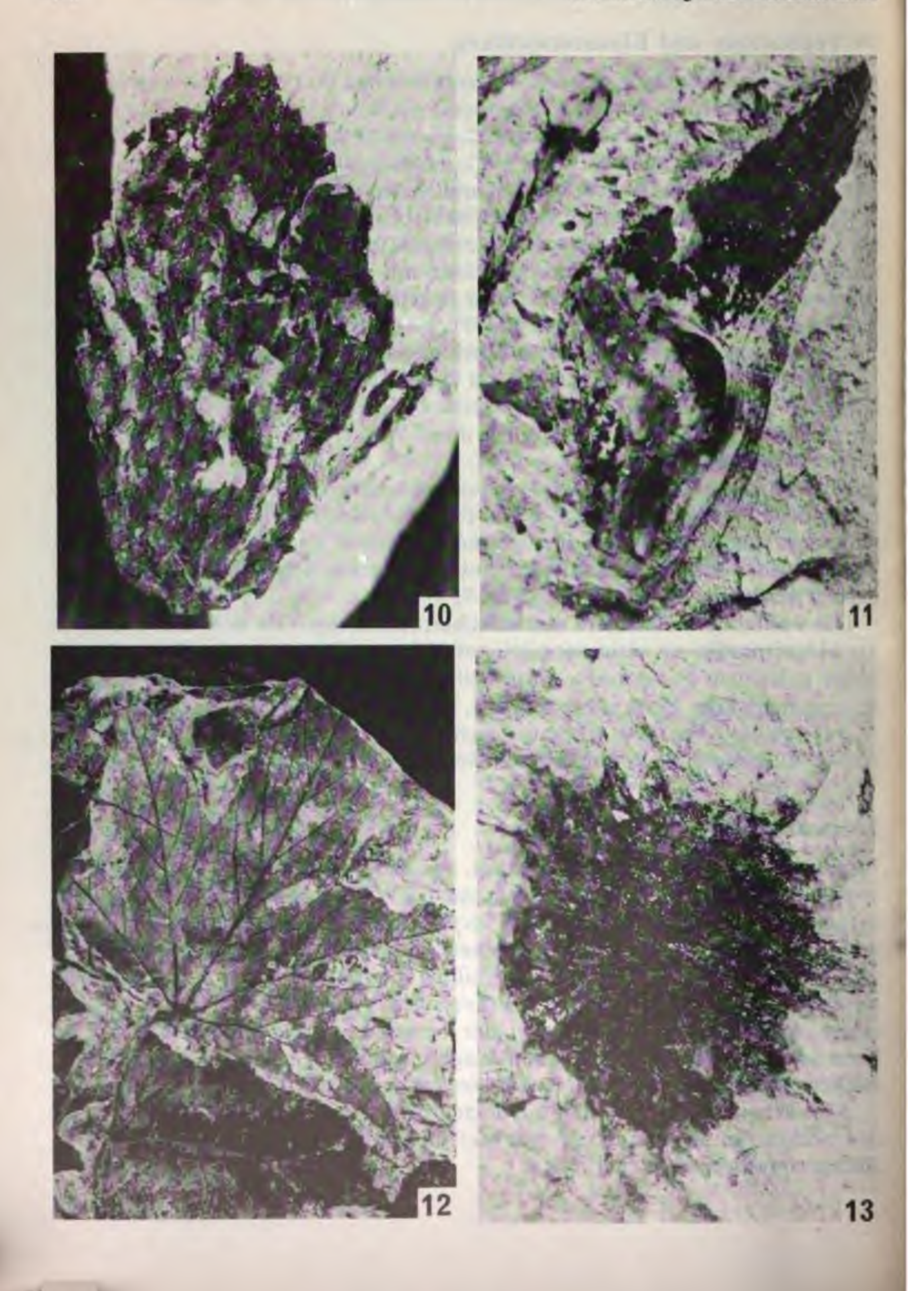
Fig. 9: Climatic range of 1) Leiachertobel 835 m, 2) Chlihörnli 930 m and 3) Chlihörnli 1000 m. Area 1 is a rough estimate which must be validated by future investigations. The JRM-range greater than 1300 mm must undergo further investigations as well. JRM = Mean annual precipitation/JMT = Mean annual temperature.

Vegetations- und Klimaentwicklung

achten wir zusammenfassend die Vegetationen und Klimate der einzelnen dhorizonte, so können wir, beginnend mit dem Leiachertobel, einen somgrünen Auenwald erkennen, dessen Elemente gegen den offenen Wasserich bis zu trockeneren Lagen hin vorkommen. Das Klima kann im jetzi- Zeitpunkt als warm-gemässigt charakterisiert werden.
m Chlihörnli 930 m ergab sich ein MMF eines Auenbereiches, der auf un- 150 m lag. Die häufigsten Elemente entstammen einem zeitweise über- emmten Uferbereich. Ein Cfa-Klima mit JMT von 15–16 °C und JRM über 1300 mm kann zu dieser Zeit angenommen werden. Am Chlihörnli m ergibt sich wiederum ein MMF eines Auenbereiches. Die häufigsten nente entstammen einem vom Hochwasser nicht mehr überschwemmten bereich. Klimatisch ergibt sich ein Cfa-Klima mit JMT von 15–17 °C und I von über 1300 mm. Einige Elemente dieses Fundpunktes weisen auf hö- gelegene Hangvegetation hin, die ihren Wasserbedarf ausschliesslich aus lerschlägen deckte.
m Chlihörnli 930 m und 1000 m ist somit klimatisch kein Unterschied zu nnen. Beide zeigen ein Cfa-warm-feuchtes Klima auf (Bild 9). In der Flo- usammensetzung selbst sind jedoch, aufgrund unterschiedlicher orogra- cher (lokales Mikroklima) oder einbettungstechnischer Verhältnisse, deut- e Unterschiede zu erkennen (Bild 7, 8).
)ie vorläufigen Resultate des Leiachertobels zeigen im tieferen Abschnitt Hörnliprofils ein warm-gemässigtes Klima auf, was somit kühler als die er gelegenen Fundpunkte wäre (Bild 9). Von der Vegetationszusammen- ung her ist die Flora sehr artenarm. Ob dies nun auf klimatische Ereignis- uf selektive Prozesse oder auf ungenügende Probenmengen zurückzuführ- ist, muss noch weiter untersucht werden.

Ausblick

ächster Zukunft wird beabsichtigt, aus den verschiedenen Fundpunkten, ziell aus dem Leiachertobel 835 m, mehr Fossilien zu isolieren, um die hier geführten Klimainterpretationen verfeinern zu können. Hierzu ist auch ei- Überprüfung der Vorkommensgrenzen des einen oder anderen Rezentver- ches notwendig. Ebenso werden mittels Kutikularanalysen unsichere Ver- che wie z. B. *Aesculus* abzusichern versucht. Als Ergänzung zu den Makro- en werden die Pollenspektren der einzelnen Sedimente untersucht. Es n so nicht nur der eigentliche Ablagerungsraum und das nähere Umfeld, dern auch das weitere Einzugsgebiet mitberücksichtigt werden.
ls nächster Schritt werden die derzeit in Bearbeitung befindlichen Floren peripheren Bereiches mit den hier dargestellten Floren des proximalen agerungsbereiches verglichen.


10
11
12
13

ammenfassung[2]

ȝeographisch haben wir uns einen ausgedehnten Schwemmfächer mit :ringem Relief und Neigungen um 5–10 m/km vorzustellen. Lokale Geınebenheiten dürften 50 m kaum überstiegen haben, was aber bereits ; zu ökologisch unterschiedlichen Lebensräumen gab. Diese Differeng fällt bei den Molluskenhäufigkeiten sofort auf: Meist prägen Helicind Clausilien das Bild. Lokal können Limaciden, Cyclostomiden, Dis:hnecken oder sogar limnische Schnecken eine grössere Rolle spielen. ie Cyclostomiden muss – im Vergleich mit der morphologisch identiheute im Tessin lebenden Art – ein warmer, eher sonniger Standort in age angenommen werden. Das Fehlen dieser Schnecke in den Auenblagerungen des Chlihörnli 930 m ist daher verständlich. Hier treten ;genüber erwartungsgemäss aquatische Mollusken auf. Etwas eigenartig lie Häufungen von Limaciden im Mergel von Ergeten 990 m und von stomiden vom Chlihörnli 990 m. In beiden Fällen scheint es sich um lo:inschwemmungen mit regional typischer Ökologie zu handeln. Die :hen Säugetierfunde geben erst wenig Hinweise: Anomalomys könnte n offenen Ufern ruhiger Gewässer aufgehalten haben. Zahlreiche Inseksser sind ebenso als Bewohner in Gewässernähe bekannt. Die meisten iden (Hamster), Gliriden (Schläfer) und Sciuriden (Hörnchen) waren an ariable Waldhabitate gebunden.

ıe sehr schöne Differenzierung der Ablagerungsgebiete erlauben die :enreste. Im noch genauer zu untersuchenden Leiachertobel 835 m ıen vorwiegend Auenwaldelemente einer warm-gemässigten Klimazone ıerrschen. Am Chlihörnli auf 930 m liegt eine typische Auenwaldvergeıaftung mit Amberbäumen, Avocados, Wasserfichten, Rosskastanien, olien, Lorbeergewächsen, Platanen, Nussbäumen und Farnen vor. Die

:rrn Dr. M. Weidmann sei für die Überlassung seiner Aufzeichnungen und Fossilfunde ı gedankt. Weiterer Dank gebührt den Herren Prof. Dr. R. Hantke und Dr. B. Engesser für ındliche Bereitschaft zur Durchsicht des Manuskriptes.

: *Glyptostrobus europaea* (Brongn.) Heer; Weiblicher Zapfen; × 3,7.

: *Glyptostrobus europaea;* Female cone; × 3,7.

: *Glyptostrobus europaea;* geflügelter Same, Ästchen & männliches Zäpfchen; × 7,2.

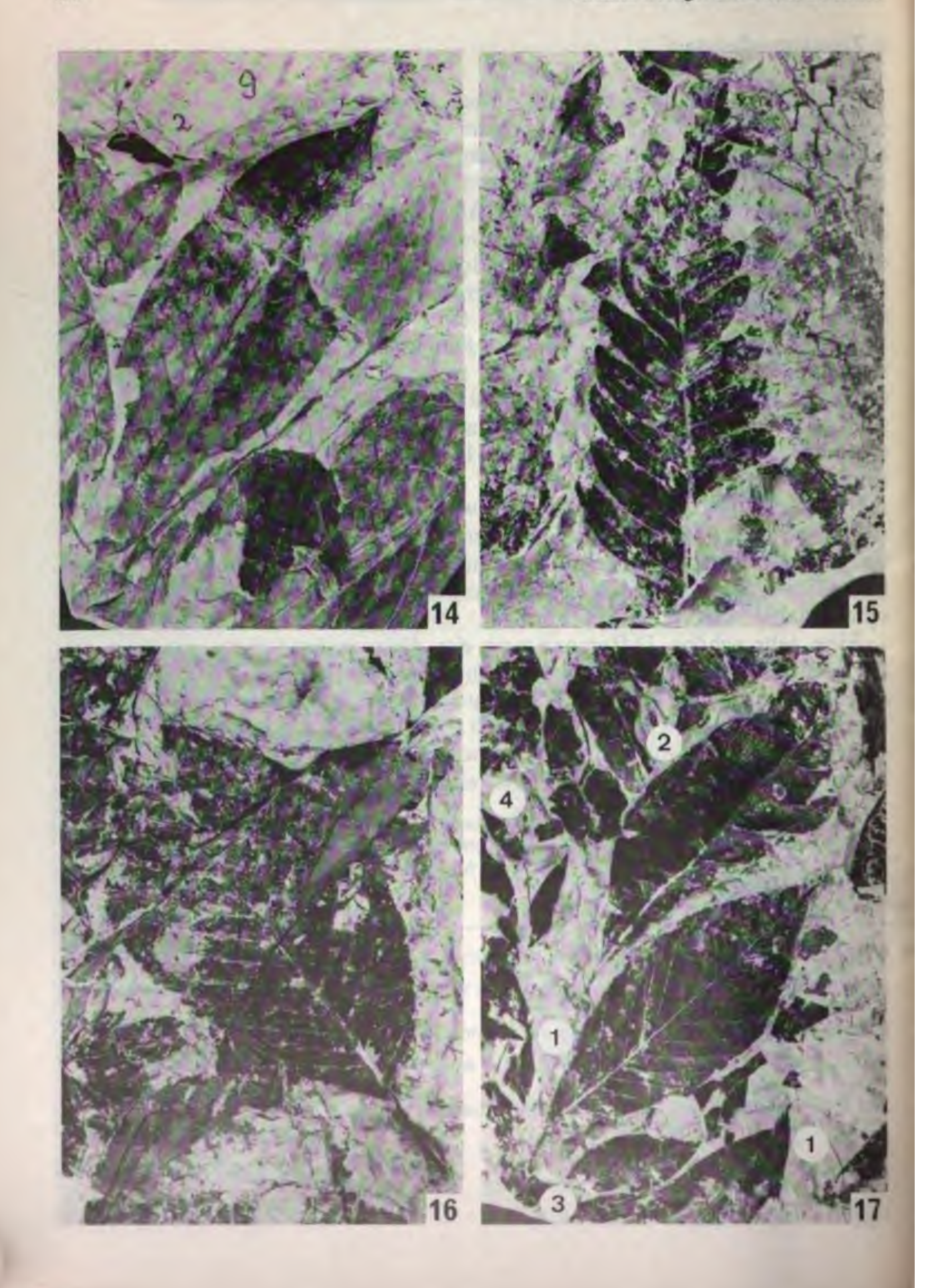
: *Glyptostrobus europaea;* Seed, branch & male cone; × 7,2.

: *Liquidambar europaea* A. Braun; Blätter; × 1.

: *Liquidambar europaea;* Leaves; × 1.

: *Liquidambar europaea;* Frucht; × 3,5.

: *Liquidambar europaea;* Fruit; × 3,5.


9
2
14
15
2
4
1
1
3
16
17

Mistel als Halbparasit ist ebenso repräsentiert. Am Chlihörnli auf 1000 m treten einige feuchtigkeitsliebende Arten des Auenwaldes zurück, während Formen des Mesophyten- und des Bergwaldes hinzukommen. Klimamässig bleibt der warm-temperierte Eindruck von Flora und Fauna an diesen beiden Fundorten erhalten.

Die meisten übrigen Fundorte sind als Überschwemmungssedimente mit mehr oder weniger lokaler Faunenvergesellschaftung anzusehen. Die cyclostomidenreiche Schicht auf 990 m am Chlihörnli oder der viele Limaciden und Kleinsäuger enthaltende Mergel von Ergeten 990 m sind dazuzuzählen.

Eine biostratigraphische Einteilung lässt sich erst bedingt durchführen. Für die Schichten von 930–1000 m kommt eine Zonierung in MN 6–7 in Frage. MN 8 kann ausgeschlossen werden. Für genauere Aussagen sind dringend mehr Kleinsäugerreste erforderlich!

Die Phytozonierung ergibt OSM 3a–3b, was mit den Befunden der wenigen bisher bekannten Säugerzähnchen in Einklang steht.

◀ Bild 14: *Persea princeps* (Heer) Schimper; Blatt; ca. × 0,7.

Fig. 14: *Persea princeps;* Leave; ca. × 0,7.

Bild 15: *Pronephrium stiriacum* (Unger); Knobloch & Kvacek; Fiederblatt; × 1,9.

Fig. 15: *Pronephrium stiriacum;* Leave; × 1,9.

Bild 16: *Aesculus;* Blatt; ca. × 0,5.

Fig. 16: *Aesculus;* Leave; ca. × 0,5.

Bild 17: 1) *Aesculus;* 2) *Juglans acuminata* A. Braun ex. Unger; 3) Cinnamomum polymorphum (A. Braun), Heer, s. Hantke; 4) *Viscum* L. Alles Blätter; ca. × 0,4.

Fig. 17: 1) *Aesculus;* 2) *Juglans acuminata;* 3) *Cinnamomum polymorphum;* 4) *Viscum.* Leaves; ca. × 0,4.

Tabelle 1: Tierfossilvorkommen in der jüngsten Hörnli-Molasse

Table 1: Fossils from 14 sites of the youngest Hörnli-Molasse

Chlihörnli	1020 m:	*Cepaea*
Chlihörnli	1000 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Cyclostoma*, *Discus*, *Limnaeus*, *Ancylus*, *Planorbis*, div., *Ophisaurus*, Säuger, Schlangenwirbel
Chlihörnli	990 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Cyclostoma*, div.
Chlihörnli	930 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Discus*, *Archaeozonites*, *Limnaeus*, *Ancylus*, div., Ostrakoden, Säuger
Ergeten	990 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Cyclostoma*, *Archaeozonites*, Säuger
Chaltenbrunnen	940 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Ancylus*, div.
Bärtobel	945 m:	*Cepaea*
Bärtobel	915 m:	*Cepaea*
Bärtobel	860 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Discus*, div., *Ophisaurus*, Säuger
Bärtobel	820 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, div.
Goggelswald	835 m:	*Cepaea*, *Clausilia*, *Cyclostoma*, *Limnaeus*, *Ophisaurus*, Säuger
Leiachertobel	805 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Discus*
Rechboden	780 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Cyclostoma*, *Archaeozonites*, *Ophisaurus*, Säuger
Chümiwisli	775 m:	*Cepaea*, *Limax*, *Clausilia*, *Cyclostoma*, Säuger

Unterstrichen: Dominante Fossilien div. = unbestimmte Schneckenreste

Tabelle 2: Kleinsäuger-Beprobungen: Koordinaten, Materialmengen, Ausbeute

Table 2: Micro-mammals: Map coordinates, amount of sediment processed, number of teeth found

Flurname	Koordinaten, Meereshöhe	Probenmengen		Anzahl Zähnchen		
		T.B.	M.W.	T.B.	M.W.	Total
Chlihörnli-Nordflanke	713 530/248 300/1000 m	40 kg		3		3
Ergeten	714 250/248 510/ 990 m	60 kg	25 kg	7	2	9
Chlihörnli-Nordflanke	713 450/248 375/ 932 m	15 kg		2		2
Chlihörnli-Nordflanke	713 440/248 380/ 930 m	10 kg	31 kg	0	2	2
Hörnli-Bärtobel	713 200/247 980/ 860 m	10 kg		4		4
Goggelswald	714 280/246 630/ 835 m	3 kg	36 kg	2	4	6
Leiachertobel	713 800/246 660/ 835 m		7 kg		2	2
Rechboden	715 470/245 870/ 780 m	10 kg		3		3
Chümiwisli	714 880/245 950/ 775 m	6 kg	15 kg	1	0	1
Hörnli-Region	775–1000 m	154 kg	114 kg	22	10	32

M.W. = Beprobung durch M. Weidmann 1986
T.B. = Beprobung durch T. Bolliger 1987/1988

Tabelle 3: Die Säugerzahnfunde: Masse und Zuordnungen. Die bisherige Ausbeute (bis Winter 1988/89) beinhaltet nun 32 bestimmbare Zahnreste von Kleinsäugern. Mit M.W. sind die Funde von M. Weidmann bezeichnet. Die unterstrichenen Nummern bezeichnen die in Bild 4 gezeigten Zähne

Table 3: Mammal teeth: measurement and identification. Until now, 32 determinable teeth have been found. M.W. indicates the fossils found by M. Weidmann. Underlined numbers designate the teeth shown in Fig. 4.

Zahn-Nr.	Länge×Breite (mm)	Zahnstellung	Gattung, Art	
	Chlihörnli	1000 m		
1Hö5A	1,76×1,20	M1 sup. dext.	*Anomalomys gaudryi*	
1Hö5B	1,16×1,12	M1 inf. sin.	*Eomuscardinus* cf. *sansaniensis*	
1Hö5C	1,08×0,68	Z sup.?	Soricide	
	Ergeten	990 m		
1Hö6C	1,44×1,52	P4 inf. dext.	*Spermophilinus* cf. *bredai*	
1Hö6D	1,04×1,04	M3 inf. dext.	*Eomuscardinus* cf. *sansaniensis*	
1Hö6E	0,92×0,96	M3 sup. sin.	*Democricetodon* cf. *brevis*	
1Hö6F	0,64×0,76	M3 inf. sin.	*Keramidomys* sp.	
1Hö7C	1,56×1,32	D inf. sin.	*Spermophilinus* cf. *bredai*	
1Hö7D	1,36×1,08	M2 inf. dext.	*Democricetodon* cf. *brevis*	
1Hö7E	1,38×1,10	M2 inf. sin.	*Democricetodon* cf. *brevis*	
48055	1,28×1,14	M2 sup. dext.	*Democricetodon* cf. *brevis*	M.W.
48056	0,92×0,90	M3 sup. dext.	*Democricetodon* cf. *brevis*	M.W.
	Chlihörnli	932 m		
1Hö4B	1,98×1,30	M2 inf. sin.	Heterosoricide	
1Hö4C	1,24×1,28	P4 sup. dext.	*Bransatoglis* cf. *astaracensis*	
	Chlihörnli	930 m		
48053	1,42×1,12	M3 inf. sin.	*Eumyarion* sp.	M.W.
48054	1,62×1,38	M2 inf. sin.	*Eumyarion* sp.	M.W.
	Hörnli-Bärtobel	860 m		
1Hö3C	– Fragm.	M1 inf. dext.	*Megacricetodon* sp.	
1Hö3A	1,28×1,08	M2 inf. sin.	*Democricetodon* cf. *similis*	
1Hö3B	1,08×0,92	M3 inf. dext.	*Democricetodon* cf. *brevis*	
1Hö3D	1,24×1,28	M2 inf. dext.	*Blackia* cf. *miocaenica*	
	Goggelswald	835 m		
48057	1,32×0,92	M1 inf. sin.	Soricide	M.W.
48058	1,04×1,98	M1 sup. dext.	Soricide	M.W.
48058	– Fragm.	P4 sup. dext.	Soricide	M.W.
48058	– Fragm.	P4 sup. sin.	Soricide	M.W.
1Hö2B	2,48×2,08	M3 inf. sin.	*Cricetodon* cf. *sansaniensis*	
1Hö2D	– Fragm.	M inf. dext.	*Lagopsis* sp.	
	Leiachertobel	835 m		
	0,87×?	M1 inf. sin.	*Microdyromys* cf. *koenigswaldi*	M.W.
48052	1,10×0,90	M2 inf. sin.	*Megacricetodon* cf. *similis*	M.W.
	Rechboden	780 m		
1Hö1D	– Fragm.	C	Erinaceide	
1Hö1E	– Fragm.	D?	Insectivor indet.	
1Hö1F	1,42×1,17	M3 inf. sin.	*Blackia* cf. *miocaenica*	
	Chümiwisli	775 m		
1Hö1A	4,00×2,50	Fragm.	Ruminantier-Prämolar	

Selaginella pliocenica	*S. apoda* (L.) Spring. *S. densa* Rydb.	Mooskraut	Nordamerika	"meadows and stream banks, mostly in calcareous soil"	N-Amerik. Nadel- und gem. Wälder	Goggelsw.	835
Sinomenium militzeri	*S. acutum* (Thumb.) Rehd. + Wils	Mondsamengewächse	Mittel- und W-China, Japan	Buschveg. des Waldrandes bis Wälder von Überschwemmungsebenen	DBLF, "cool temp. zone" Japans	Chlihörnli	1000
Smilax sagittifera	*S. aspera* L.	Stechwinde	Tropische und gem. Zonen beider Halbkugeln (S-Europa bis Indien)	Warme, geschützte Lagen Humoser, lockerer Boden		Chlihörnli	930
Sparganium camenz.	*S stoloniferum* ?	Igelkolben		An Seen- und Tümpelrändern Pflanzenteile teilweise untergetaucht	"pond and lake vegetation" in Japan	Chlih.	930 +1,5
Typha latissima	*T. latifolia* L.	Rohrkolben	Atl. Nordamerika, Europa, SW-Russland bis Japan	Uferpflanze nährstoffreicher Gewässer	"temperate reg." Japans/EBLF	Leiachertb.	835
Ulmus longifolia	*U. americana* L.	Amerik. Ulme	Atl. Nordamerika, Veg. des E und SE-N-Amerika	Fluss- und Bachauen, teilw. überschw. Schlickböden in Flussauen. Nasse Standorte	Sommergrüne Auenwälder und Gebüsche/ Ulmen-Silberahorn-Wälder	Chlihörnli	1000
Viscum (Phoradendron)	*Viscum* L. *Phoradendron* Nutt.	Mistel	Temperierte und warme Zonen der Erde	Parasitisch auf Bäumen lebend		Chlihörnli	930
Vitis teutonica	*Vitis*	Rebe	Nördl. gemässigte Zonen	Sonnige, warme Lage, schwerer Boden		Chlihörnli	1000
Zelkova	*Z. serrata* (Thunb.) Mak.	Zelkove	Japan (W- und E-Asien)	Normale Böden – nicht feucht		Chlihörnli	930
Zoocecidium Typ 4	*Bertia moriformis* ?	Pflanzengalle (Pilze)	***B. moriformis*** gehört zur Familie der Coronophoraceae (Ascomycetes), welche auf Eichen vorkommen. Die fossile Art ist nicht direkt mit der hier angegebenen rezenten Art vergleichbar. Die rezenten Formen haben nicht so grosse Tubercel. Sie könnten jedoch auf anderen, exotischen Eichen vorkommen.			Chlihörnli	1000

Abkürzungen:
- JMT = Jahresmitteltemperatur
- JRM = Jährliche Regenmenge
- DBLF = Deciduous Broad Leaved Forest
- MMF = Mixed Mesophytic Forest
- EBLF = Evergreen Broad Leaved Forest
- ESBLF = Evergreen Sclerophyllous Broad Leaved Forest

Die Angaben über das Verbreitungsgebiet der Vergleichstaxa, die klimat. + ökologischen Bedürfnisse sowie die Pflanzenverbands-Zugehörigkeit entstammen folgenden Werken:

Gleason, A. H.:	1952	Lancucka-Srodoniova, M.:	1979
Gregor, H. J.:	1982a	Mai, D. H. & Walther, H.:	1978
Hantke, R.:	1954, 84	Numata, M.:	1972, 74
		Ohwi, J.:	1965

Literatur

lliger, T. 1987: Stratigraphie der Molasse im Raum Stäfa–Jona–Wald (Kantone Zürich und St. Gallen). Diplomarbeit an der Phil. Fak. II der Universität Zürich; deponiert: Geol. Inst. ETH Zürich.

lliger, T.; Gatti, H.; Hantke, R. 1988: Zur Geologie und Paläontologie des Zürcher Oberlandes. Vjschr. natf. Ges. Zürich *133/1*: 1–24.

chi, U. P. 1957: Zur Gliederung der Oberen Süsswassermolasse (OSM) zwischen Bodensee und Reuss. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum – Geol. u. Ing. *24/66*: 35–42.

rgisser, H. M. 1980: Zur mittelmiozänen Sedimentation im nördlichen Molassebecken: Das «Appenzeller-Granit»-Leitniveau des Hörnli-Schuttfächers (Obere Süsswassermolasse, Nordostschweiz). Diss. ETH Zürich.

rgisser, H. M. 1981: Zur zeitlichen Einordnung der Oberen Süsswassermolasse in der Nordostschweiz. Vjschr. natf. Ges. Zürich *126/3*: 140–164.

rgisser, H. M.; Furrer, H.; Hünermann, K. A. 1983: Stratigraphie und Säugetierfaunen der mittelmiozänen Fundstellen Hüllistein und Martinsbrünneli (Obere Süsswassermolasse, Nordostschweiz). Eclogae geol. Helv. *76/3*: 773–762.

ızek, C. 1971: Tertiary Flora from the Northern Part of the Petipsy Area (North-Bohemian Basin). Ustredniho Ustavu Geologickeho, *36*, Prag.

›erhard, M. 1986: Litho- und Biostratigraphie im Oberen Süsswassermolasse-Fächer der Adelegg (Südbayern). Jb. Geol. B.-A., *129/1*: 5–39, Wien.

›erhard, M. 1987: Entwicklung von Sedimentation, Flora, Fauna, Klima und Relief von Mittelmiozän bis Quartär zwischen Arlberg (Vorarlberg/Tirol) und Adelegg (Allgäu). Diss. ETH Zürich.

berhard, M. 1989: Klimaänderungen vom Mittel- bis Obermiozän aufgrund makroskopischer Pflanzenreste in Altwasserablagerungen der Adelegg (Allgäu). Geologica Bavarica, *91*, München (im Druck).

ngesser, B. 1972: Die obermiozäne Säugetierfauna von Anwil (Baselland), Dissertation Universität Basel, Lüdin AG, Liestal.

ngesser, B.; Matter, A.; Weidmann, M. 1981: Stratigraphie und Säugetierfaunen des mittleren Miozäns von Vermes (Kt. Jura). Eclogae geol. Helv. *74/3*: 893–952.

ahlbusch, V.; Wu, W. 1981: Puttenhausen: Eine neue Kleinsäuger-Fauna aus der Oberen Süsswasser-Molasse Niederbayerns. Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol. *21*: 115–119, München.

erguson, D. K. 1971: The Miocene Flora of Kreuzau, Western Germany. Verh. kon. nederl. Akad. Wet. Afd. Naturkde., Tweede Reeks, *60/1*, Amsterdam.

eologischer Dienst der Armee 1970: Blatt 1093 Hörnli – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000. Schweiz. geol. Kommission (mit Erläuterungen).

ileason, A. H. 1952: Illustrated Flora of the Northeastern United States and adjacent Canada. The New York Bot. Garden, *1–3*, Lancaster (Lancaster Press).

ötz, E. 1975: Die Gehölze der Mittelmeerländer. Ein Bestimmungsbuch nach Blattmerkmalen. Stuttgart (Ulmer).

raham, A. 1972: Floristics and Paleofloristics of Asia and Eastern North America. Amsterdam, London, New York (Elsevier).

regor, H. J. 1980: Ein neues Klima- und Vegetationsmodell für das untere Sarmat (Mittelmiozän) Mitteleuropas unter spezieller Berücksichtigung floristischer Gegebenheiten. Verh. Geol. B.-A., *1979/3*: 337–353, Wien.

regor, H. J. 1982a: Die jungtertiären Floren Süddeutschlands. Stuttgart (Enke).

regor, H. J. 1982b: Eine Methode der ökologisch-stratigraphischen Darstellung und Einordnung von Blattfloren unter spezieller Berücksichtigung der Tertiär-Ablagerungen Bayerns. Verh. Geol. B.-A., *1982/2*: 5–19, Wien.

ıbicht, J. K. A. 1987: Internationales Stratigraphisches Lexikon, Band I Europa, Faszikel 7b Schweizerisches Mittelland (Molasse). Birkhäuser Verlag, Basel/CH.

[illegible]	[illegible]	[illegible]	Nordamerika	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	Mondsamengewächse	Mittel- und W-China, Japan	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Smilax [illegible]	[illegible]	Stechwinde	Tropische und gem. Zonen beider Halbkugeln · S-Europa bis Indien ·	Warme, geschützte Lagen. Humoser, lockerer Boden		Chlihörnli	[illegible]
Sparganium [illegible]	*S. stoloniferum*	Igelkolben		An Seen- und Tümpelrändern. Pflanzenteile teilweise untergetaucht	"pond and lake vegetation" in Japan	Chlih	[illegible]
Typha latissima	*T. latifolia* L.	Rohrkolben	Atl. Nordamerika, Europa, SW-Russland bis Japan	Uferpflanze nährstoffreicher Gewässer	"temperate reg." Japans, EBLF	Leuacherli	[illegible]
Ulmus longifolia	*U. americana* L.	Amerik. Ulme	Atl. Nordamerika, Veg. des E und SE-N-Amerika	Fluss- und Bachauen, teilw. überschw. Schlickböden in Flussauen. Nasse Standorte	Sommergrüne Auenwälder und Gebüsche Ulmen-Silberahorn-Wälder	Chlihörnli	1000
Viscum/*Phoradendron*	*Viscum* L. *Phoradendron* Nutt.	Mistel	Temperierte und warme Zonen der Erde	Parasitisch auf Bäumen lebend		Chlihörnli	930
Vitis teutonica	*Vitis*	Rebe	Nördl. gemässigte Zonen	Sonnige, warme Lage, schwerer Boden		Chlihörnli	1000
Zelkova	*Z. serrata* (Thunb.) Mak.	Zelkove	Japan (W- und E-Asien)	Normale Böden – nicht feucht		Chlihörnli	930
Zooecidium Typ 4	*Bertia moriformis* ?	Pflanzengalle (Pilze)	*B. moriformis* gehört zur Familie der Coronophoraceae (Ascomycetes), welche auf Eichen vorkommen. Die fossile Art ist nicht direkt mit der hier angegebenen rezenten Art vergleichbar. Die rezenten Formen haben nicht so grosse Tubercel. Sie könnten jedoch auf anderen, exotischen Eichen vorkommen.			Chlihörnli	1000

Abkürzungen:

JMT = Jahresmitteltemperatur
JRM = Jährliche Regenmenge
DBLF = Deciduous Broad Leaved Forest
MMF = Mixed Mesophytic Forest
EBLF = Evergreen Broad Leaved Forest
ESBLF = Evergreen Sclerophyllous Broad Leaved Forest

Die Angaben über das Verbreitungsgebiet der Vergleichstaxa, die klimat. + ökologischen Bedürfnisse sowie die Pflanzenverbands-Zugehörigkeit entstammen folgenden Werken:

Gleason, A. H.:	1952	Lancucka-Srodoniova, M.:	1979
Gregor, H. J.:	1982a	Mai, D. H. & Walther, H.:	1978
Hantke, R.:	1954, 84	Numata, M.:	1972, 74
Horvat, I. et. al.:	1974	Ohwi, J.:	1965
Knapp, R.:	1965	Van der Burgh, J.:	1983
Kräusmann, G.:	1960, 62		

7 Literatur

Bolliger, T. 1987: Stratigraphie der Molasse im Raum Stäfa–Jona–Wald (Kantone Zürich und St. Gallen). Diplomarbeit an der Phil. Fak. II der Universität Zürich; deponiert: Geol. Inst. ETH Zürich.

Bolliger, T.; Gatti, H.; Hantke, R. 1988: Zur Geologie und Paläontologie des Zürcher Oberlandes. Vjschr. natf. Ges. Zürich *133*/1: 1–24.

Büchi, U.P. 1957: Zur Gliederung der Oberen Süsswassermolasse (OSM) zwischen Bodensee und Reuss. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum – Geol. u. Ing. *24*/66: 35–42.

Bürgisser, H.M. 1980: Zur mittelmiozänen Sedimentation im nördlichen Molassebecken: Das «Appenzeller-Granit»-Leitniveau des Hörnli-Schuttfächers (Obere Süsswassermolasse, Nordostschweiz). Diss. ETH Zürich.

Bürgisser, H.M. 1981: Zur zeitlichen Einordnung der Oberen Süsswassermolasse in der Nordostschweiz. Vjschr. natf. Ges. Zürich *126*/3: 140–164.

Bürgisser, H.M.; Furrer, H.; Hünermann, K. A. 1983: Stratigraphie und Säugetierfaunen der mittelmiozänen Fundstellen Hüllistein und Martinsbrünneli (Obere Süsswassermolasse, Nordostschweiz). Eclogae geol. Helv. *76*/3: 773–762.

Buzek, C. 1971: Tertiary Flora from the Northern Part of the Petipsy Area (North-Bohemian Basin). Ustredniho Ustavu Geologickeho, *36*, Prag.

Eberhard, M. 1986: Litho- und Biostratigraphie im Oberen Süsswassermolasse-Fächer der Adelegg (Südbayern). Jb. Geol. B.-A., *129*/1: 5–39, Wien.

Eberhard, M. 1987: Entwicklung von Sedimentation, Flora, Fauna, Klima und Relief von Mittelmiozän bis Quartär zwischen Arlberg (Vorarlberg/Tirol) und Adelegg (Allgäu). Diss. ETH Zürich.

Eberhard, M. 1989: Klimaänderungen vom Mittel- bis Obermiozän aufgrund makroskopischer Pflanzenreste in Altwasserablagerungen der Adelegg (Allgäu). Geologica Bavarica, *91*, München (im Druck).

Engesser, B. 1972: Die obermiozäne Säugetierfauna von Anwil (Baselland), Dissertation Universität Basel, Lüdin AG, Liestal.

Engesser, B.; Matter, A.; Weidmann, M. 1981: Stratigraphie und Säugetierfaunen des mittleren Miozäns von Vermes (Kt. Jura). Eclogae geol. Helv. *74*/3: 893–952.

Fahlbusch, V.; Wu, W. 1981: Puttenhausen: Eine neue Kleinsäuger-Fauna aus der Oberen Süsswasser-Molasse Niederbayerns. Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol. *21*: 115–119, München.

Ferguson, D.K. 1971: The Miocene Flora of Kreuzau, Western Germany. Verh. kon. nederl. Akad. Wet. Afd. Naturkde., Tweede Reeks, *60*/1, Amsterdam.

Geologischer Dienst der Armee 1970: Blatt 1093 Hörnli – Geol. Atlas Schweiz 1:25 000. Schweiz. geol. Kommission (mit Erläuterungen).

Gleason, A.H. 1952: Illustrated Flora of the Northeastern United States and adjacent Canada. The New York Bot. Garden, *1–3*, Lancaster (Lancaster Press).

Götz, E. 1975: Die Gehölze der Mittelmeerländer. Ein Bestimmungsbuch nach Blattmerkmalen. Stuttgart (Ulmer).

Graham, A. 1972: Floristics and Paleofloristics of Asia and Eastern North America. Amsterdam, London, New York (Elsevier).

Gregor, H.J. 1980: Ein neues Klima- und Vegetationsmodell für das untere Sarmat (Mittelmiozän) Mitteleuropas unter spezieller Berücksichtigung floristischer Gegebenheiten. Verh. Geol. B.-A., *1979*/3: 337–353, Wien.

Gregor, H.J. 1982a: Die jungtertiären Floren Süddeutschlands. Stuttgart (Enke).

Gregor, H.J. 1982b: Eine Methode der ökologisch-stratigraphischen Darstellung und Einordnung von Blattfloren unter spezieller Berücksichtigung der Tertiär-Ablagerungen Bayerns. Verh. Geol. B.-A., *1982*/2: 5–19, Wien.

Habicht, J.K.A. 1987: Internationales Stratigraphisches Lexikon, Band 1 Europa, Faszikel 7b Schweizerisches Mittelland (Molasse). Birkhäuser Verlag, Basel/CH.

Hantke, R. 1954: Die fossile Flora der obermiozänen Oehninger-Fundstelle Schrotzburg (Schienerberg, Südbaden). Denkschr. SNG, *80/2*, Zürich.
Hantke, R. 1966: Die fossilen Liquidambar-Reste (Amberbaum) aus der Molasse der Schweiz und von Oehningen (Südbaden). Eclogae geol. Helv., *59/2*: 981–988, Basel.
Hantke, R. 1984: Floreninhalt, biostratigraphische Gliederung und Paläoklima der mittelmiozänen Oberen Süsswassermolasse (OSM) der Schweiz und ihrer nördlichen Nachbargebiete. A. Wetzler-Gedenkbd. – Molasseforschung '84 –, Heimatl. Schrr. Ldkr. Günzburg, *2:* 47–53, Günzburg.
Hantke, R., und Mitarb. 1967: Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete, 1:50 000. Vjschr. natf. Ges. Zürich *112/2*.
Heizmann, J.P.; Fahlbusch, V. 1983: Die mittelmiozäne Wirbeltierfauna vom Steinberg (Nördlinger Ries). Eine Übersicht. Mitt. Bayer. Staatsslg. Paläont. hist. Geol. *23:* 83–93, München.
Hofmann, F. 1951: Zur Stratigraphie und Tektonik des st. gallisch-thurgauischen Miozäns (Ob. Süsswassermolasse) und zur Bodenseegeologie. Ber. st. gall. natw. Gesellsch. *74*/3; Diss. Uni Zürich.
Horvat, I.; Glavac, V.; Ellenberg, H. 1974: Vegetation Südosteuropas. Jena (Fischer).
Kirchheimer, F. 1942: Laubblätter aus dem älteren Tertiär der Lausitz. Planta Arch. wiss. Bot. *33*/1;: 91–150, Berlin.
Kirchheimer, F. 1957: Die Laubgewächse der Braunkohlenzeit. Halle/Saale (Knapp).
Knapp, R. 1965: Die Vegetation von Nord- und Mittelamerika und der Hawaii-Inseln. Berlin (Fischer).
Krüssmann, G. 1960/62: Handbuch der Laubgehölze, Bd. *I, II*. Berlin-Hamburg (Parey).
Lancucka-Srodoniowa, M. 1979: Macroscopic Plant Remains from the Freshwater Miocene of the Nowy Sacz Basin (West Carpathians, Poland). Acta Palaeobot., *20*/1, Warszawa-Krakow.
Letsch, E. 1899: Die Molassekohlen östlich der Reuss. Beitr. zur geol. Karte der Schweiz. Geotechn. Serie, 1. Lieferung.
Li, H.L. 1963: Woody Flora of Taiwan. Pennsylvania (Livingston).
Mai, D.H., & Walther, H. 1978: Die Floren der Haselbacher Serie im Weisselsteiner Becken (Bezirk Leipzig, DDR). Abh. staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden, *28*, Leipzig.
Miall, A.D. 1984: Principles of Sedimentary Basin Analysis. Springer Verlag; New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo.
Numata, M. 1974: The Flora and Vegetation of Japan. Amsterdam, London, New York (Elsevier).
Ohwi, J. 1965: Flora of Japan. National Science Mus., Tokyo, Japan – Smithsonian Inst., Washington D.C.
Tanner, H. 1944: Beitrag zur Geologie der Molasse zwischen Ricken und Hörnli. Mitt. thurg. natf. Ges. *33*, Frauenfeld.
Van der Burgh, J. 1983: Allochthonous Seed and Fruit Floras from the Pliocene of the Lower Rhine Basin. Rev. Palaeobot. Palynol, *40*, Amsterdam.
Van der Burgh, J. 1987: Miocene Floras in the Lower Rhenish Basin and their Ecological Interpretation. Rev. Palaeobot. Palynol, *52*, Amsterdam.
Walker, R.G. (Herausgeber). 1979: Facies Models. Geosciences Canada, Reprint Series 1. Geological Association of Canada, Ontario.
Wang, C.W. 1961: The Forests of China with a Survey of Grassland and Desert Vegetation. Maria Moors Cabot Foundation, *5*, Harvard Univ., Cambridge, Massachusetts.
Wu, W. 1982: Die Cricetiden (Mammalia, Rodentia) aus der Oberen Süsswasser-Molasse von Puttenhausen (Niederbayern). Zitteliana *9:* 37–80, München.

Thomas Bolliger, Geologisches Institut ETH, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.
Dr. Mark Eberhard, Geologisches Institut ETH, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134/2*: 139–150

Die Logik oder Die Kunst des Programmierens

Ernst Specker, ETH Zürich

Die Grundgedanken der Logikprogrammierung werden am Beispiel eines Geduldspiels (Türme von Hanoi) erläutert. Die möglichen Stellungen dieses Spiels bilden einen Graphen, wenn zwei Stellungen durch eine Kante verbunden werden, falls sie durch einen legalen Zug auseinander hervorgehen. Dieser Graph wird auf zwei Arten realisiert: zum einen in unserer materiellen Welt mit Hilfe einer Vervielfältigungsmaschine, zum anderen in der idealen Welt von Herbrand mit Hilfe der Logikprogrammierung.

Logic or the Art of Programming

The fundamental ideas of logic programming are explained by considering a puzzle (the Towers of Hanoi). The possible positions of the puzzle form a graph, two positions being joined by an edge if they can be transformed into one another by a legal move. Two realizations of this graph are introduced: one in our material world with the help of a copying machine, the other in the ideal world of Herbrand with the help of logic programming.

1 Einleitung

Bis ins 19. Jahrhundert wurde an den Universitäten Logik gelehrt, um angehende Geistliche, Juristen, Ärzte mit der Kunst des richtigen Denkens vertraut zu machen. Eines der klassischen Werke für diesen Unterricht war «La logique ou l'art de penser» von A. Arnauld und P. Nicole, in erster Auflage 1662 erschienen. Inzwischen ist das Bemühen, mit Logikunterricht zu richtigem Denken anleiten zu wollen, aufgegeben worden, vermutlich weniger aufgrund des Wandels der klassischen Logik in eine mathematische Disziplin als aus der Überzeugung, dass richtiges Denken in einem Fachgebiet nur in ständiger Auseinandersetzung mit dem Fache selbst entwickelt werden kann und sich nicht einfach aufgrund allgemeiner Prinzipien von aussen herantragen lässt.

Die Logiker haben damit einen grossen Teil ihrer Studenten verloren. Um so erfreulicher ist es für sie, dass es gelungen ist, ein neues Zielpublikum zu finden. Es hat sich nämlich gezeigt, dass gewisse logische Sprachen ausgezeichnete Programmiersprachen sind und dass das, was in der Logik unter dem Begriff «Beweis» untersucht wird, auch als «Berechnung» oder «Datenverarbeitung» aufgefasst werden kann. Die bekannteste dieser neuen Programmiersprachen ist PROLOG (PROgrammierung in LOGic).

Die einfachsten Grundgedanken der Logikprogrammierung sollen im folgenden an einem konkreten Beispiel (den Türmen von Hanoi) erläutert werden. Die Türme von Hanoi sind von E. Lucas als Geduldspiel beschrieben worden. (Die Erfindung schreibt Lucas dem Mandarin N. Claus am siamesischen Kollegium Li-Sou-Stian zu. An welchem französischen Kollegium hat wohl Lucas unterrichtet?) Dabei ist unser Ziel nicht, die durch die Türme von

Hanoi gestellte Aufgabe zu lösen, sondern es soll vielmehr gezeigt werden, wie die durch sie definierte Struktur sich in einem «Herbrand-Universum» mit Logikprogrammierung definieren lässt. Dazu gehen wir in zwei Schritten vor. In einem ersten Schritt ordnen wir der Struktur einen Graphen zu und überlegen uns, wie sich dieser Graph mit Hilfe von Kopiergeräten und dem Zeichnen von neuen Kanten in unserer materiellen Welt realisieren lässt. Im zweiten Schritt werden diese Konstruktionen in der idealen Welt eines Herbrand-Universums (nach Jacques Herbrand, 1908–1931) mit logischen Mitteln nachvollzogen.

2 Die Türme von Hanoi als Graph

Als materielles Objekt bestehen die Türme von Hanoi aus einer Platte, in die drei Pflöcke eingelassen sind, und aus einigen (z. B. vier) in der Mitte gelochten Scheiben unterschiedlicher Grösse. In der Ausgangslage befinden sich alle Scheiben pyramidenförmig geordnet auf einem Pflock. Die Aufgabe besteht dann darin, diese Pyramide durch eine Folge von «legalen Zügen» auf einen anderen Pflock zu transferieren. Ein legaler Zug besteht dabei in folgendem: Von einem Pflock wird die oberste Scheibe abgehoben und (zuoberst) auf einen anderen Pflock gelegt; dabei darf sie nur auf die Platte oder auf eine grössere Scheibe zu liegen kommen (Bild 1).

Wir bezeichnen die Pflöcke mit a, b, c, die Scheiben der Grösse nach mit 1, 2, 3, 4 (die grösste).

Befinden sich etwa auf Pflock a die Scheiben 1, 2 (1 auf 2 liegend), auf b die Scheibe 4 und auf c die Scheibe 3, so gibt es drei mögliche legale Züge:

(I) Scheibe 1 von a nach b (sie kommt auf 4 zu liegen)
(II) Scheibe 1 von a nach c (sie kommt auf 3 zu liegen)
(III) Scheibe 3 von c nach b (sie kommt auf 4 zu liegen).

Andere Züge sind offenbar nicht zulässig; Scheibe 3 darf nicht auf Pflock a transferiert werden und Scheibe 4 weder auf a noch auf c. Man überlegt sich leicht, dass in jeder Situation, die aus der Ausgangsstellung durch eine Folge von legalen Zügen hervorgeht, die Scheiben auf jedem Pflock der Grösse nach geordnet sind; da nämlich bei jedem Zug eine Scheibe nur auf eine grössere oder die Platte gelegt wird, bleibt diese Eigenschaft erhalten. Solche Verteilungen der Scheiben auf die Pflöcke sollen «Stellungen» heissen. Durch einen legalen Zug geht eine Stellung in eine andere über, indem eine Scheibe, die auf einer grösseren (oder der Platte) liegt, auf eine grössere (oder die Platte) transferiert wird. Hieraus folgt, dass auch das Zurücknehmen eines legalen Zuges ein legaler Zug ist.

Wie viele Züge sind in einer Stellung möglich? Befinden sich alle Scheiben auf einem Pflock, so sind es deren zwei: die Scheibe 1 (in Spitzenposition) darf auf einen der beiden anderen Pflöcke transferiert werden. In jedem ande-

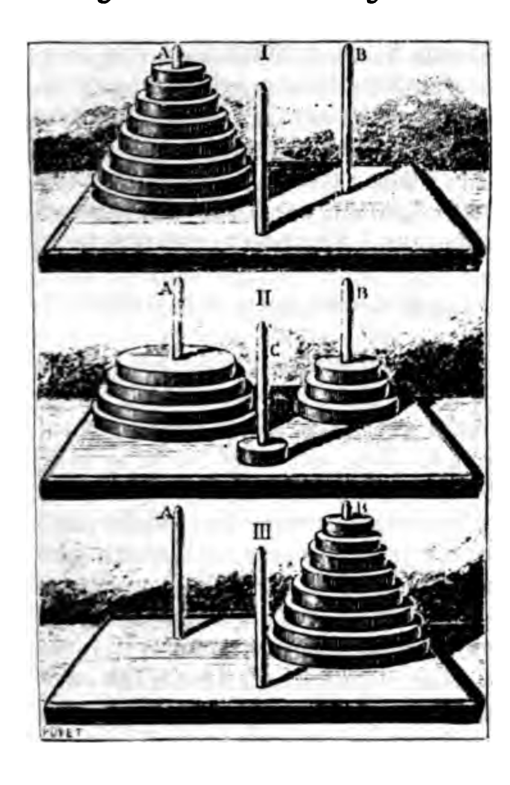


Bild 1 Türme von Hanoi nach Lucas

Fig. 1 Towers of Hanoi according to Lucas

ren Fall gibt es 3 legale Züge: Ausser der Scheibe 1 (wofür 2 Möglichkeiten bestehen) darf die zweitkleinste Scheibe in Spitzenposition auf einen anderen Pflock (wo sich nicht Scheibe 1 befindet) transferiert werden.

Wie viele Stellungen gibt es im ganzen, etwa im Fall von 4 Scheiben? Um diese Anzahl zu bestimmen, stellen wir uns vor, dass eine Stellung folgendermassen erzeugt wird (dies sind keine legalen Züge!):

Mit der grössten Scheibe beginnend, werden die 4 Scheiben der Reihe nach auf die (zunächst unbelegten) Pflöcke gelegt; jedesmal haben wir 3 Möglichkeiten der Wahl, im ganzen also $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 81$ Möglichkeiten. Da auf diese Art offenbar jede Stellung genau einmal erzeugt wird, gibt es bei 4 Scheiben 81 Stellungen. (Und bei n Scheiben entsprechend deren 3^n.)

Gewisse Paare dieser 81 Stellungen besitzen die Eigenschaft, dass die eine aus der anderen durch einen legalen Zug hervorgeht. Denken wir uns die 81 Stellungen durch Punkte markiert und zwei Punkte durch eine Kante verbunden, falls sie einem solchen Paar von Stellungen zugeordnet sind, so erhalten wir einen Graphen. Wie sieht dieser Graph – er heisse G_4 – aus?

Wir fragen dazu zuerst nach den Graphen G_1 (Stellungen bei einer Scheibe) und G_2 (2 Scheiben). Bei einer Scheibe gibt es entsprechend den 3 Pflökken drei Stellungen, und jede geht durch einen legalen Zug in jede andere über: G_1 ist ein Dreieck.

Um G_2 zu erhalten, zerlegen wir die Menge S_2 der 9 Stellungen von zwei Scheiben entsprechend der Lage der grösseren Scheiben in 3 Teilmengen S_2^a, S_2^b, S_2^c. S_2^b etwa ist die Menge der Stellungen, bei denen die grössere Scheibe auf Pflock b liegt. Je zwei Stellungen von S_2^b sind durch eine Kante verbunden – wir dürfen uns die grössere Scheibe mit der Platte verschmolzen denken und befinden uns dann im Fall von G_1. Entsprechendes gilt von S_2^a, S_2^c. Wir können uns also den Graphen G_2 aufgebaut denken aus 3 Dreiecken, entsprechend der Lage der grösseren Scheibe.

Wie steht es mit Kanten einer Stellung aus S_2^a nach aussen, d. h. nach Stellungen in S_2^b, S_2^c?

Für die Stellung, bei der sich beide Scheiben auf Pflock a befinden, gibt es keine Verbindung nach aussen: Scheibe 2 kann nicht bewegt werden. Liegt aber etwa Scheibe 1 auf Pflock b, Scheibe 2 auf a, so kann Scheibe 2 auf Pflock c transferiert werden: Diese Stellung in S_2^a ist mit einer Stellung in S_2^c verbunden. Ganz entsprechend ist die dritte Stellung in S_2^a mit einer Stellung in S_2^b verbunden. Damit ist der Graph G_2 eindeutig bestimmt: Er besteht aus 3 Dreiecken G_2^a, G_2^b, G_2^c, die noch reihum durch je eine Kante verbunden sind (Bild 2). Auf ganz analoge Weise kann nun G_3 aufgrund von G_2, G_4 aufgrund von G_3 gebildet werden; man hat nur zu beachten, dass an die Stelle der Dreiecke G_2^a über S_2^a etc. Graphen des vorangehenden Typus treten.

Wir beschreiben den Übergang von G_3 nach G_4. Es sei G_4^a der Graph, welcher 4 Scheiben entspricht, bei dem Scheibe 4 sich auf Pflock a befindet. Scheibe 4 spielt dann für die Legalität von Zügen keine Rolle, d. h. G_4^a ist isomorph zu G_3 (derselbe Graph, nur über einer anderen Menge).

Entsprechendes gilt für G_4^b, G_4^c. G_4 ist also aufgebaut aus 3 Kopien von G_3. Es bleibt zu diskutieren, welche Kanten von G_4^a nach aussen führen.

In G_3 (und entsprechend in G_4^a) gibt es 3 Punkte, die nur mit zwei anderen durch eine Kante verbunden sind. Diese Punkte entsprechen den Stellungen, wo sich alle 3 kleineren Scheiben auf ein und demselben Pflock befinden; befindet sich auch die grösste Scheibe 4 auf diesem Pflock, so gibt es keine Kan-

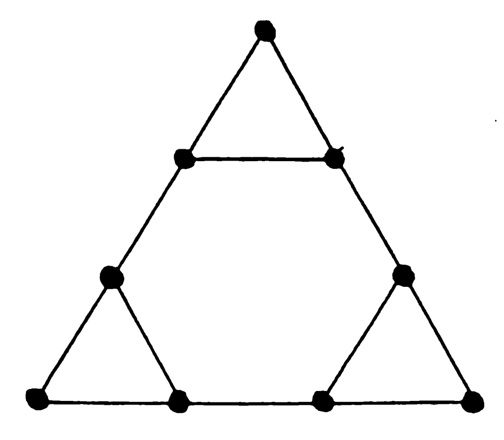


Bild 2: Der Graph, welcher Türmen mit 2 Scheiben entspricht.

Fig. 2: Graph associated to towers with 2 disks.

te nach aussen. Befinden sich aber alle kleineren Scheiben auf b, die grösste auf a, so kann diese nach c transferiert werden. Es gibt somit genau eine Kante von G_4^a nach G_4^c. Damit ist G_4 bestimmt. Wir wollen nun den Übergang noch etwas abstrakter (und damit einfacher) beschreiben. Es sei H ein Graph mit der Eigenschaft, dass alle Punkte bis auf drei mit genau drei anderen durch eine Kante verbunden sind. Die drei Ausnahmepunkte seien p, q, r; sie seien mit genau zwei anderen durch eine Kante verbunden.

Es werden nun drei isomorphe Kopien H^a, H^b, H^c von H erstellt. Der neue Graph G bestehe aus der Vereinigung der Graphen H^a, H^b, H^c, worin noch drei neue Kanten eingetragen sind. In der Vereinigung gibt es zunächst offenbar neun Ausnahmepunkte: Aus p wird p^a, p^b, p^c, aus q wird q^a, q^b, q^c, und aus r wird r^a, r^b, r^c.

Die drei neuen Kanten verbinden je

p^b mit p^c,
q^a mit q^c,
r^a mit r^b.

Damit gehen auch von p^b, p^c, q^a, q^c, r^a und r^b drei Kanten aus, und neue Ausnahmepunkte sind p^a, q^b, r^c. Aufgrund dieser Konstruktion ist es nun sehr einfach, mit Hilfe eines Kopiergerätes den Graphen zu erzeugen.

Es liege eine Darstellung von H vor, und zwar seien die Ausnahmepunkte die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks, und der Graph befinde sich innerhalb dieses Dreiecks. Es werden dann 3 Kopien von H erstellt, diese 3 Kopien entsprechend der Figur 1 auf ein Blatt geklebt und die 3 neuen Kanten eingetragen. Auch der neue Graph liegt dann auf einem gleichseitigen Dreieck, und das Verfahren kann iteriert werden. Figur 3 zeigt den so erzeugten Graphen G_4 entsprechend dem Fall von 4 Scheiben.

Durch die so beschriebene Konstruktion geht offenbar ein zusammenhängender Graph in einen ebensolchen über: Je zwei Stellungen der Hanoi-Türme können somit durch eine Folge von legalen Zügen ineinander übergeführt

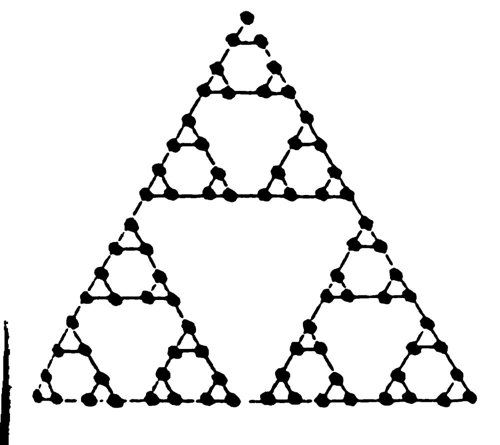


Bild 3: Der Graph, welcher Türmen mit 4 Scheiben entspricht.

Fig. 3: Graph associated to towers with 4 disks.

werden, insbesondere also eine Pyramide von einem Pflock auf einen anderen. Ebenso können viele andere Fragen leicht beantwortet werden, z. B. die Frage nach der Anzahl der benötigten Züge, nach der Eindeutigkeit des Weges bei minimaler Zugzahl, etc.

3 Die Türme von Hanoi im Herbrand-Universum

Für die Definition der Türme mit Hilfe der Logikprogrammierung verwenden wir «Listen». Alle diese Listen werden aus den Konstanten a, b, c, s aufgebaut sein. Dass wir sie Konstanten nennen, bedeutet, dass sie wie Eigennamen zu verstehen sind, allerdings nicht wie Namen von Personen der realen Welt, sondern eher wie Namen von Märchengestalten – Rumpelstilzchen existiert in seiner Geschichte und sonst nirgendwo.

Wir geben einige Beispiele von Listen: [a, b, c, a, s]. Diese Liste besteht aus vier Elementen; das Element a ist der Kopf der Liste, die Liste [b, c, a, s] der Rest. Um anzudeuten, dass [a, b, c, a, s] so aus Kopf und Rest gebildet ist, sagen wir auch

[a, b, c, a, s] ist [a | [b, c, a, s]].

Listen können demnach aufgefasst werden als Terme, gebildet mit dem zweistelligen Funktionszeichen

[X | Y];

als Argument an zweiter Stelle ist nur eine Liste zugelassen.

Um mit dieser Bildung alle Listen zu erhalten, brauchen wir als Ausgangsliste die leere Liste [ ].

Die Liste [a] ist dann die Liste

[a | [ ]].

Die Liste [[a, b] | [a, a, b]]
besteht aus 4 Elementen; das erste Element ist selbst eine Liste, sie ist also die Liste

[[a, b], a, a, b].

Als Universum (sogenanntes Herbrand-Universum), worin wir unsere Strukturen definieren, wählen wir die Konstanten a, b, c, s und alle Listen, die – in iterierten Anwendungen der Listenbildung – aus ihnen gebildet werden können. Für unsere Zwecke der Definition der Hanoi-Türme müssen wir allerdings nur Listen von Listen von Listen heranziehen.

Ein Dreieck über a, b, c können wir uns durch folgende Liste von Listen definiert denken:

[[a, b], [b, c], [c, a]].

Die Liste [a,b] steht dabei für die Kante von a nach b. Bei Listen kommt es an und für sich auf die Reihenfolge an; so ist [a,b] nicht dieselbe Liste wie [b,a]. Trotzdem können wir verabreden, dass das Vorkommen von [a, b] die Kante von a nach b anzeigen soll. Es ist ja auch die Reihenfolge der Kanten in der Liste gleichgültig. Es stellt somit

[[c,a], [b,c], [b,a]]

ebenfalls das Dreieck über a, b, c dar.

Ein wesentlicher Schritt bei der Konstruktion der Hanoi-Graphen grösserer Scheibenzahl ist der Übergang von einem Graphen zu drei isomorphen und disjunkten Kopien.

Ein solcher Übergang ist am leichtesten zu bewerkstelligen, wenn Punkte des Graphen selbst schon Listen sind.

Ist nämlich [s] ein solcher Punkt, so können wir [s] verdreifachen, indem wir a, b, c davorsetzen und zu [a,s], [b,s], [c,s] übergehen. Aus diesem Grund wollen wir den Hanoi-Graphen mit einer Scheibe als Dreieck über [a], [b], [c] darstellen. Es ist dann der Graph

[[[a], [b]], [[b], [c]], [[c], [a]]].

Wir halten das fest durch das «Axiom»

(1) hanoi ([s], [[[a], [b]], [[b], [c]], [[c], [a]]]).

Damit ist eine Beziehung zwischen [s] – eine Scheibe – und dem entsprechenden Graphen stipuliert.

Wenn nun der Graph

[[[a], [b]], [[b], [c]], [[c], [a]]]

verdreifacht werden soll mit a, b, c, so können wir dies zunächst für eine Variable X (wofür später a, b, c zu setzen sein wird) andeuten.

Das isomorphe X-Bild soll sein

[[[X,a], [X,b]], [[X,b], [X,c]], [[X,c] [X,a]]].

(Allgemein verwenden wir die Konvention: Grossbuchstaben für Variable mit möglichen Werten im Herbrand-Universum, Kleinbuchstaben für Konstante.)

Für die Definition dieser Bildung im allgemeinen Fall betrachten wir zunächst die X-Markierung einer Liste von Listen.

Eine Liste von Listen wird dabei mit X markiert, indem bei jeder Liste aus L das Element X an erste Stelle gesetzt wird.

Die s-Markierung von

[[a,b], [c,b,a], [b], [ ]]

ist also [[s,a, b] [s,c,b,a], [s,b], [s]].

Wir führen dafür ein dreistelliges Prädikat mark(, ,) ein: mark(X,L,M) soll gelten, falls M die X-markierte Liste L ist.

Offenbar ist die X-markierte leere Liste die leere Liste, also

(2) mark(X,[ ],[ ]).

Für Menschen könnten wir weiter definieren

$$\text{mark}(X,[Y_1,\ldots,Y_m],\ [[X\,|\,Y_1],\ldots,[X\,|\,Y_m]]).$$

Für automatisches Bearbeiten ist dies kaum hinreichend. Wir legen daher fest, wie das Markieren einer Liste zurückzuführen ist auf das Markieren einer kürzeren Liste. Die zu markierende Liste sei [Y | L], also erstens Liste Y, gefolgt von einer Liste L von Listen.

Die markierte Liste wird somit mit [X | Y] beginnen, und es wird eine Liste M folgen. Was ist M? M ist offenbar die mit X markierte Liste L. Wir halten dies fest durch

(3) mark(X,[Y | L],[[X | Y] | M]) :- mark(X, L, M).

Die Zeilen (2) und (3) bilden ein Prolog-Programm, mit dessen Hilfe Listen markiert werden. Das Zeichen «:-» steht dabei für «falls»; in der Logik ist es üblich, dies mit einer Implikation auszudrücken:

mark(X, L, M) → mark(X,[Y | L],[[X | Y] | M]).

Die Variablen «laufen» dabei über alle Terme des Herbrand-Universums.

Wie kann nun ein solches Programm, enthaltend die beiden Zeilen (2), (3), benützt werden?

Wir können Fragen an das Programm stellen, etwa in der Form

?- mark(a,[[b],[c,a]], U).

Dies ist zu interpretieren als Aufforderung, einen Term U (d. h. eine Liste) zu finden, für welchen die Gültigkeit aus (2) und (3) folgt.

Die Frage, die am leichtesten zu beantworten ist, ist dabei

?- mark(a,[ ], U).

Aus (2) folgt unmittelbar die Antwort

U = [ ].

Wie steht es mit schwierigeren Fragen?

Wir wollen ausführlich den folgenden Fall betrachten:

?- mark(a,[[b],[c,a]], U).

Die Ausführungen sind vielleicht nicht ganz leicht zu verfolgen; so tröstet sich vielleicht mancher Leser damit, dass er die Antwort

U = [[a, b],[a, c, a]]

zu geben vermag.

Wie ist es denkbar, dass aus (2), (3) sich eine Antwort ergibt? (2) hilft offenbar zunächst nicht.

Falls wir dagegen

mark(a,[[b],[c,a]],U)

als die linke Seite von (3) auffassen können, so haben wir einen ersten Schritt getan. Es sei also

mark(a,[[b],[c,a]],U) identisch
mark(X,[Y | L],[[X | Y] | M]).

Dafür muss gelten

X identisch a;
[Y | L] identisch [[b],[c,a]]
[[X | Y] | M] identisch U.

Die Identität von [Y | L] mit [[b],[c,a]] bedeutet

Y identisch [b],
L identisch [[c,a]].

Um weiterzukommen, müssen wir die rechte Seite von (3) zur Verfügung haben, d. h.

mark(X,L,M).

Aufgrund der obigen Identitäten bedeutet dies

mark(a,[[c,a]],M).

Wir stellen also an das Programm die Frage (genauer: das Programm soll sich selber die Frage stellen!)

?- mark(a,[[c,a]],M).

Zur Beantwortung dieser Frage gehen wir genau gleich vor; (2) hilft nicht, und wir setzen eine Identifikation mit der linken Seite von (3) an.

Dabei muss verhindert werden, dass eine Variablenkollision auftritt. In jeder Verwendung von (3) sollen die Variablen neu bezeichnet werden.

mark(X1,[Y1 | L1],[[X1 | Y1] | M1]) :- mark(X1,L1,M1).

Durch Identifikation der linken Seite mit mark(a,[[c,a]],M) erhalten wir

X1 identisch a;
[Y1 | L1] identisch [[c,a]]
[[X1 | Y1] | M1] identisch M.

Ferner brauchen wir mark(X1,L1,M1). Aus den Identifikationen folgt:

Y1 ist identisch [c,a], L1 ist die leere Liste,
d. h. mark(X1,L1,M1) ist mark(a,[ ],M1).

Auf die Frage

?- mark(a,[ ],M1)

erhalten wir unmittelbar aus (2) die Antwort

M1 = [ ].

[[X1 | Y1] | M1] ist also

[[a | [c, a]] | [ ]], was nichts anderes als [[a, c, a]] ist.

Damit haben wir gefunden

mark (a, [[c, a]], [[a, c, a]]),

und wir können einen weiteren Schritt zurückgehen und finden die Antwort.

U = [[a, b], [a, c, a]].

Der Lösungsweg wird somit aufgrund einer Rückwärtsanalyse gefunden. Das Axiom (3) ist von der Art, dass ihm entnommen werden kann, aufgrund welcher Kenntnis eine Antwort möglich ist. Diese Kenntnis wird als neue Frage formuliert und das Verfahren iteriert.

Natürlich können nicht alle Probleme nach einem solchen einfachen Schema angegangen werden. Es ist aber überraschend, wie vielfältig die Anwendungsmöglichkeiten sind.

Das Schema ist übrigens verallgemeinerungsfähig: Es funktioniert auch in einem Fall wie

?- A :- K1, K2.

Für die Antwort A brauchen wir K1 und K2.

Unsere nächste Definition ist von dieser Art:

Aufgrund des Prädikates mark ist es nun leicht, isomorphe Kopien von Graphen zu definieren.

Graphen sind Listen von Listen von Listen; sie werden in isomorphe Kopien transformiert, indem den innersten Listen ein neuer Kopf vorangesetzt wird; dies ist gleichbedeutend mit der Markierung der zweitinnersten Listen.

isomorph(X, L, M) bedeute:

Durch Markierung der Elemente von L entsteht aus L die Liste M. Somit

(4) isomorph(X,[ ],[ ]).

(5) isomorph(X,[Y | L],[Z | M]) :- mark(X, Y, Z), isomorph(X, L, M).

Das Komma zwischen mark(X, Y, Z) und isomorph(X, L, M) bedeutet die Konjunktion.

Das X-Bild von [Y | L] wird erhalten, indem die erste Liste Y mit X markiert wird (was Z ergibt) und der Rest in das X-Bild transformiert wird.

Mit Hilfe von «isomorph» können von einem Graphen H drei isomorphe Kopien definiert werden:

isomorph (a, H, Ha),
isomorph (b, H, Hb) und isomorph (c, H, Hc).

(Verbindungen wie Ha gelten als eine Variable; die Notation dient nur der leichteren Lesbarkeit.)

Als nächstes soll nun das Aufkleben der drei Kopien auf einem Blatt im Herbrand-Universum nachgebildet werden. Diese Operation entspricht dem Verketten von drei Listen zu einer Liste. Es werde zunächst das Verketten von zwei Listen definiert:

verkettung (L, M, N)

gelte, wenn N die Liste ist, in der zuerst die Elemente von L, dann jene von M aufgeführt sind.

(6) verkettung([ ], L, L).
(Ist die erste Liste leer, so ist das Resultat die zweite.)

(7) verkettung([X | L], M, [X | N]) :- verkettung(L, M, N).
(Wird [X | L] mit M verkettet, so ist X das erste Glied der neuen Folge; der Rest ist die Verkettung von L und M.)

Für spätere Zwecke definieren wir die Verkettung von 4 Listen A, B, C, D zu einer neuen Liste L; dazu wird A, B zu H und C, D zu I verkettet; L ist dann die Verkettung von H und I. Somit

```
(8) verkettung(A, B, C, D, L) :- verkettung(A, B, H),
                                 verkettung(C, D, I),
                                 verkettung(H, I, L).
```

Als nächstes sind nun noch die drei Kanten zu definieren, welche die Kopien verbinden.

Wir nehmen an, dass wir den Fall betrachten, bei dem aus dem Graphen von 3 Scheiben jener von 4 konstruiert wird. Ferner seien die 3 Punkte in H, welche nur zu zwei Kanten gehören, die Tripel [a, a, a], [b, b, b], [c, c, c].

Durch Markierung werden daraus:

[a, a, a, a], [a, b, b, b], [a, c, c, c] (in Ha),
[b, a, a, a], [b, b, b, b], [b, c, c, c] (in Hb),
[c, a, a, a], [c, b, b, b], [c, c, c, c] (in Hc).

Wir definieren nun die Kanten

[b, a, a, a] nach [c, a, a, a],
[a, b, b, b] nach [c, b, b, b],
[a, c, c, c] nach [b, c, c, c].

Von den 9 obigen Punkten erhalten nur [a, a, a, a], [b, b, b, b] und [c, c, c, c] keine neuen Kanten.

Auch beim neuen Graphen gehören genau jene Punkte nur zu zwei Kanten, die den Listen mit nur einem Element entsprechen.

Die Scheibenzahl wollen wir im Herbrand-Universum durch eine Liste aus s darstellen; [s, s, s] soll also drei Scheiben bedeuten, [s, s, s, s] deren vier.

Wir definieren ein Prädikat konstant (, ,), das uns gestattet, von [s, s, s] überzugehen zu [a, a, a] etc.

```
(9)  konstant(X,[ ],[ ]).
(10) konstant(X,[Y|L],[X|M]) :- konstant(X,L,M).
```

(konstant(X, L, M) gilt, falls die Listen L, M gleich lang sind und M nur aus dem Element X besteht.)

Damit können wir nun die Listen der 3 neuen Kanten definieren, die beim Übergang des Graphs, der zur s-Liste S gehört, neu einzuführen sind:

```
(11) neu(S,K) :- konstant(a,S,A),
                 konstant(b,S,B),
                 konstant(c,S,C),
                      K = [[[b|A],[c|A]],[[a|B],[c|B]],[[a|C],[b|C]]].
```

Ist S etwa die Liste [s, s, s], so ist A die Liste [a, a, a,], und es tritt als neue Kante [[b, a, a, a], [c, a, a, a]] auf, was dasselbe ist wie [[b | A], [c | A]].

Damit können wir die Hanoi-Graphen allgemein definieren:

```
(12) hanoi([s|S],G) :- hanoi(S,H),
                       isomorph(a,H,Ha),
                       isomorph(b,H,Hb),
                       isomorph(c,H,Hc),
                       neu(S,K),
                       verkettung(Ha,Hb,Hc,K,G).
```

Das kann so gelesen werden: G ist der Graph zu [s | S], wenn folgendes gilt: H ist der Graph zu S, Ha, Hb, Hc sind die 3 entsprechenden Kopien; K ist die Liste der 3 neuen Kanten; G ist die Verkettung von Ha, Hb, Hc, K.

Die Frage

```
?- hanoi([s,s,s,s],U)
```

wird beantwortet mit der Liste U der 120 Kanten des Graphen G_4.

4 Literatur

Arnauld A., Nicole P. (1622/1981), La logique ou l'art de penser, ed. crit.
Lloyd J. W. (1987), Foundations of Logic Programming, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin.
Lucas E. (1883), Récréations mathématiques, vol. 3, Gauthier-Villars, Paris.
Sterling L., Shapiro E. (1986), The Art of Prolog, MIT Presss, Cambridge Mass.

Prof. Dr. Ernst Specker, Steinbrüchelstrasse 45, 8053 Zürich.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/2: 151–156

Algorithmen, Strukturen, Maschinen: Inhalte der Informatik[1]

Friedrich L. Bauer, T. U. München

1 Einleitung

Die Informatik ist eine junge Wissenschaft, der Bezeichnung nach nicht älter als dreissig Jahre. Sie formierte sich zwischen 1936 und 1951. Ihre Wurzeln sind allerdings viel älter, zu einem guten Teil liegen sie ausserhalb der Mathematik: in der Logik, der Kryptologie, der Instrumentenkunde, der Feinmechanik, der Nachrichtentechnik.

Neu war um die Mitte des Jahrhunderts die Zusammenschau vieler vorher isoliert betrachteter Ideen und Phänomene.

Ich will in diesem Vortrag versuchen, Ihnen die breite Basis der Informatik, ihre Grundinhalte näherzubringen. Ich konzentriere mich dabei auf drei Begriffe: Algorithmus, Struktur, Maschine. Unter Hintanstellung meiner beruflichen Arbeitsmethode, der Formalisierung, will ich (fast) ohne Formelkram auskommen und deshalb die phänomenologische Seite in den Vordergrund stellen. Die Fachgenossen mögen mir verzeihen, wenn dadurch für sie das Gleichgewicht zwischen formalem und intuitivem Verständnis nicht gewahrt zu sein scheint.

2 Ursprünge des Zählens

Zählen ist eine Errungenschaft des Menschen, eine relativ spät einsetzende geistige Leistung des homo sapiens. Es entstand unabhängig in verschiedenen Kulturkreisen, wie wir aus dem Auftreten verschiedener Zahlsysteme wissen: bei den Azteken, in China, in Ägypten, bei den Sumerern.

Vom Zählen der Tage zwischen den Neumonden und dem Zählen der Neumonde zwischen den Äquinoktien geht der Anstoss aus zur Betrachtung der Sterne; da der Himmel das Reich der Götter ist, bekommt auch das Zählen göttliche Aspekte, Zahlen werden mystische Symbole. So könnte man Kroneckers Ausspruch verstehen: «Die ganzen Zahlen hat der liebe Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk.» Gegenüber dem bis heute fortbestehenden Mystischen gewinnt aber die praktische Seite der Zahlen bald die Oberhand.

Der Umgang mit Münzen und Gewichten, die Chronologie und die Landmessung bestimmen in der Antike und im Mittelalter, wohin sich die Mathematik entwickelt. Zum Rechnen benutzt man den Abakus, das Rechenbrett.

3 Algorithmen

In Indien entsteht aus sumerischen Anfängen, wohl einige Jahrhunderte nach Christi Geburt, eine neue Art, Zahlen zu schreiben: ein Stellenwertsystem. Schlüsselpunkt war die Erfindung eines Lückenzeichens, eines Zeichens für «Nichts», das indische sunya. Im Arabischen wurde das als sifr übersetzt, und daraus wurde chiffre, Ziffer, cipher, aber auch italienisch zefiro, zevero, woraus zéro und zero entstand.

[1] Festvortrag vor der Bayerischen Akademie der Wissenschaften; Nachdruck aus dem Jahrbuch 1987 (ohne Bildmaterial) mit freundlicher Genehmigung des Autors und des Verlegers.

Aber auch bei den Mayas in Mexiko sind Stellenwertschreibweise und ein Lückenzeichen zu finden – sicher unabhängig von Babylon.

Die Kunst, mit den neuen Ziffern zu rechnen, bekam den Namen *algorithmus;* die Leute, die das konnten, hiessen *algoristen,* im Gegensatz zu den *abacisten.* Die Bezeichnung rührt her von Abu Dsch'far Mohammed ibn Musa al-Khowarizmi – einem Mann, der um 820 n. Chr. in der ostpersischen Region Khowarizm lebte, nahe der Stadt Khiva in der heutigen Sowjetrepublik Uzbekistan. Um 1100 wurde al-Khowarizmis Buch «Hisab al dschabr w'al muqabala» als «algebra et almucabala» ins Lateinische übersetzt, und schon 1202 pries Leonardo di Pisa, Hofmathematiker des Kaisers Friedrich II., besser bekannt als Fibonacci, die neue Kunst in den höchsten Tönen. Im 16. Jahrhundert war der Kampf zwischen dem alten und dem neuen Rechnen voll entbrannt. Erst die Französische Revolution lässt Rechenbretter und Rechenpfennige (Leg-Geld) in West- und Mitteleuropa verschwinden; in Osteuropa, in Asien hält sich der Abakus bis heute.

Algorithmen nannte man dann später das Verfahren zum Rechnen mit Ziffern. Die Universität Altdorf lockte um 1550 Studenten an mit dem Versprechen, sie würden dort das Dividieren erlernen. Noch Leibniz spricht vom «Algorithmus der Multiplikation». Über die Jahrhunderte hinweg nahm dann das Wort Algorithmus eine allgemeinere Bedeutung an; so spricht man – obwohl Euklid von al-Khowarizmi noch nichts wusste – vom «Euklidischen Algorithmus» zur Bestimmung des grössten gemeinsamen Teilers zweier Zahlen und auch vom «Algorithmus der altägyptischen Multiplikation», die beide nichts mit dem Ziffernrechnen an sich zu tun haben. Algorithmus bedeutet heute «ein Spiel mit Zeichen nach festgesetzten Regeln». Damit gibt es auch Algorithmen für das Mühlespiel, für das Stricken eines Zöpfchenmusters, für das Aufsperren eines Safes.

4 Die Befreiung des Menschen von der Last gleichförmiger geistiger Tätigkeit

Das Rechnen gilt zu Recht als geistige Tätigkeit, wennschon es ziemlich eintönig ist. Pascals Schwester etwa sagte, ihr Bruder habe die Rechenmaschine erfunden, weil er es leid gewesen sei, für seinen Vater, der Steuereinnehmer war, die Rechnung zu führen. Auch Schickard, Tübinger Professor der biblischen Sprachen, Pascal um 18 Jahre voraus, stand unter dem Eindruck umfangreicher Berechnungen, und zwar in der Astronomie. Bei Leibniz, der eine seiner Maschinen gar für den Kaiser von China bestimmt hatte, findet sich schon der Gedanke, dass geistige Routinearbeit des Menschen unwürdig sei. Automaten hatte schon das Rokoko gesehen, Androiden, Automaten in Menschengestalt, waren in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zur literarischen Mode geworden – bei Jean Paul, bei E. T. A. Hoffmann.

Ist Leibniz' Maschine als Hilfsmittel zur Durchführung des Multiplikationsalgorithmus, so strebte Charles Babbage um 1830 mehr an: die volle Automatisierung des Ablaufs eines allgemeineren Algorithmus. Er stützte sich bei seinen Versuchen auf einen Lochkartensteuerungs-Mechanismus, mit dem Jacquard um 1800 Webstühle automatisiert hatte. Er scheiterte an technischen Schwierigkeiten. Konrad Zuse, der 1934 Arbeiten aufnahm, die zum Erfolg führten, wusste damals nichts von Babbage. Drei Jahre später, 1937, bricht mit Alan M. Turing der Gedanke einer universalen Maschine durch, die *jeden* Algorithmus ausführen kann – nicht nur einen bestimmten und nicht nur einen arithmetischen. Was eine Turing-Maschine oder verwandterweise ein Markov-Algorithmus tut, erinnert in der Tat oft mehr an Stricken und Weben als ans Rechnen – man betrachte nur das über das Rechenband fahrende «Schiffchen» des Markov-Algorithmus für die Bildung der Ableitung eines Binärwortes. Schon Ada Countess Lovelace, Schülerin und Vertraute Babbages, hatte geschrieben «the analytical engine weaves algebraic patterns». War das Poesie oder Vision? Wohl das letztere, denn Lady Lovelace hatte schon erkannt, dass die Maschine «general symbols» kombinieren könne. Ihr folgend, könnte man sagen «Algorithmen weben Muster».

5 Strukturen

Muster gibt es vielerlei, in der Mathematik und anderswo. In der belebten Natur finden wir an einem kühlen Morgen ein Spinnennetz, von Tautropfen überzogen. Unter dem Mikroskop erweisen sich die Kieselsäureskelette der Radiolarien als bizarre regelmässige Strukturen.

Die Entdeckung des genetischen Codes brachte biologische Molekülstrukturen zum Vorschein. Heute benutzt man Rechner, um sie zu zeichnen. Bilder, die den strukturellen Aufbau der ringförmigen Ribonukleinsäuresequenzen von Viroiden (Exocertis-Krankheit der Citrusbäume, Spindelknotensucht der Kartoffel, Staudenkrankheit der Chrysantheme) zeigen, erinnern fast an musikalische Notation.

In der unbelebten Natur finden wir Kristalle und als ihr mathematisches Gerüst Kristallgruppen. Es gibt vielerlei Muster allein im Zusammenhang mit diskreten Gruppen, etwa Cayley-Diagramme, die die Verknüpfungsstruktur von Gruppen widerspiegeln, Polytope, Polyeder oder Tesselierungen einer hyperbolischen Ebene, wie sie Walther von Dyck, in der Nachfolge von Felix Klein, untersucht hat. Der holländische Grafiker M.C. Escher hat diese Strukturen künstlerisch verwandt und verwandelt.

6 Algorithmen erzeugen Strukturen

Im Zusammenhang mit nichtlinearen Iterationen sind in den letzten Jahren, angestossen durch Mandelbrot, viele eindrucksvolle Computergraphiken entstanden, darunter solche, die an Klöppelspitzen erinnern.

Unerschöpflich sind die von Menschen geschaffenen Strukturen beim Weben, Stricken, Häkeln, Knüpfen, Knoten, Klöppeln, Flechten. Für alle diese Arbeiten wurden Maschinen erdacht und somit Algorithmen festgelegt. Die Umkehrung würde zur These führen: *Was Algorithmen tun, ist die Erzeugung von Strukturen.* In der Tat dienen Strukturen oft als «gefrorene Algorithmen»: Tabellen sind Beispiele. Präziser können wir sagen: Die Informatik handelt von der Erzeugung neuer Strukturen aus alten. Aus Gründen der Denkökonomie werden diese Strukturen abstrakt aufgefasst. Sie mögen *Objektstrukturen* heissen, wobei die Objekte im jeweiligen Zusammenhang nicht weiter zu zerlegende Primitive sind. Es gibt vielerlei solche Objekte. Zahlen beispielsweise dienen häufig als Objekte – wenn es sich aber um den Aufbau eines Rechenwerkes handelt, sind Zahlen Objektstrukturen, gebildet aus Ziffern.

Abweichend von unserem gebräuchlichen Dezimalsystem kommt das Dualsystem mit bloss zwei Ziffern, Null und Eins, aus. Das war Leibniz' Entdeckung in der arithmetica dyadica, 1679. Leibniz sah darin ein weiterreichendes philosophisches Prinzip, das wir heute Binärprinzip, salopp auch Ja-Nein-Prinzip, Alles-oder-Nichts-Prinzip nennen. So ist sein «anchora sacra», das «heilige Noch», vielleicht die Ahnung, dass alle effektiv handhabbaren Objekte als Strukturen aus dyadischen – wir sagen heute binären – Elementen aufgefasst werden können; es ist jedenfalls die Vorwegnahme der formalisierten zweiwertigen («dyadischen») Aussagenlogik. Wie man für das Dualsystem eine arithmetische Maschine bauen kann, hat Leibniz schon angegeben. Leibniz als Vorläufer von Boole, Turing und Zuse zugleich – wahrlich ein grosser Mann.

Dezimalzahlen und auch Dualzahlen sind deutlich gegliederte Strukturen. Schon in den Anfängen der Informatik betrachtete man gegliederte Daten, etwa Konrad Zuse im Plankalkül «Angaben» für die Bestandteile technischer Strukturen oder für Feldbesetzungen beim Schach. In ALGOL 60 findet sich das wieder in den dynamischen mehrstufigen Feldern, die gut geeignet sind, Matrizen und Tensoren darzustellen. Nichtnumerische Anwendungen führten Mitte der fünfziger Jahre auf die Verwendung von Listen mit Verweisen. Dijkstra und Knuth verdanken wir einleuchtende Illustrationen des funktionellen Verhaltens solcher Strukturen am Beispiel von Gleisanlagen. Aber erst allmählich bildet sich die Abstraktion heraus, die sich vom Zwang des Speicherskeletts frei macht und zu den rekursiven Datenstrukturen von Hoare 1970 führt, zu deren Definition eine blosse Formel genügt, die den erzeugenden Algorithmus beschreibt. In diesen Strukturen treten nicht mehr allein Ziffern und Zahlen, sondern beliebige Zeichen und Zeichengruppen auf.

7 Rechnerstrukturen

Auch Rechengeräte weisen Strukturen auf. Dies zeigt ein Blick auf den mechanischen Speicher von Konrad Zuse. Deutlich kommt es in den Schaltbildern für elektromagnetische und elektronische Rechenanlagen zum Ausdruck. Man sieht es auch am äusseren Erscheinungsbild der PERM, der von Hans Piloty und meinem verehrten Lehrer und väterlichen Freund Robert Sauer stammenden Maschine aus den frühen fünfziger Jahren. Seit den sechziger Jahren findet überdies mit dem Aufkommen der gedruckten und geätzten Schaltungen eine Konvergenz der Schaltungen gegen die Schaltbilder statt. In der heutigen Mikrominiaturisierung sind Schaltung und Schaltbild eins geworden. Auf kleinstem Raum sind Tausende von Schaltelementen vereinigt, eindrucksvolle Muster bildend. Hochkomplizierte Algorithmen erzeugen diese Muster, die als Vorlagen für photolithographische Prozesse dienen. Im Rasterelektronenmikroskop kann man die Oberfläche der so auf einem Siliciumplättchen entstehenden Schaltung sichtbar machen. Dabei spielen Abmessungen unter 1 μm eine Rolle, gut zehnmal feiner als die von Nervenfasern. Der Grössenvergleich mit Nervennetzen mag beeindruckend sein, sagt aber wenig über funktionelle Analogien. Insbesondere arbeitet das Zentralnervensystem nicht nach dem «Alles-oder-Nichts-Prinzip» der Computer. Für Computer gibt es keine Psychopharmaka; dass sie Launen haben mögen, ist eine Mär.

8 Strukturen der Algorithmen

Algorithmen weben Muster, haben wir festgestellt. Kein Wunder, dass sie selbst Struktur tragen. Allerdings wäre es einfach anzunehmen, die Erzeugnisse von Algorithmen wären blosse Abbilder, der Replikation von Desoxyribonukleinsäure-Ketten vergleichbar. Algorithmen fangen typischerweise den Aufbau von komplizierten Mustern auf einfachere Art ein: Das Zauberwort heisst Rekursion. Als «Bild im Bild» ist dieses Prinzip seit dem Altertum bekannt und künstlerisch wie literarisch ausgebeutet worden.

Nichtsdestoweniger zeigen Algorithmen Gesetzmässigkeiten des Aufbaus, Strukturen. In Maschinenprogrammen wird diese Struktur verwischt. Ablaufpläne – und mehr noch symbolisch notierte Algorithmen – bringen diese innere Struktur zum Ausdruck.

Programmieren ist nichts anderes als Strukturieren. Es bringt Struktur in ein amorphes Problem – so viel Struktur zumindest, dass damit eine operative Problemlösung entsteht. Hat man schon eine Problemlösung, so kann Programmieren trivial sein: es entartet zum Kodieren, zur rein notationellen Aufgabe.

9 Programmieren als Entwicklungsprozess – Programmieren als Kalkül

Häufig muss jedoch eine Problemlösung melioriert werden: es muss nach effizienteren Fassungen gesucht werden. Darin liegt die Kunst des Programmierens. Der oben erwähnte Algorithmus der altägyptischen Multiplikation, durchgeführt etwa mit römischen Zahlen, ist bereits eine Meliorierung des trivialen Verfahrens der 43mal wiederholten Addition.

Programmieren ist also, recht verstanden, stets ein solcher Entwicklungsprozess. Entwickelt wird die Struktur des Algorithmus, aber auch die Struktur der Objekte, mit denen dieser Algorithmus arbeitet. Oft gehen diese beiden Entwicklungen Hand in Hand, etwa wenn der effizientere Algorithmus der ägyptischen Multiplikation durch den Leibnizschen Übergang zur Dualzahldarstellung unterstützt wird.

Programmentwicklung bedeutet in der Regel Verfeinerung der Programm- und Objektstruktur. Damit wird aber Programmentwicklung selbst zum Gegenstand eines Algorithmus. Rutishauser und Ershov bezeichneten schon Anfang der fünfziger Jahre zu Recht ihre Compiler als «programmierende Programme». Weit darüber hinausgehend, wird heute Programmieren zu einem rationalen Prozess, einer schrittweisen Transformation von Strukturen, vom geeignet strukturierten Problem zur Maschine führend. *Programmieren selbst bekommt algorithmische Züge.* Wir können

ı durch Abstraktion unabhängig machen von zeitweiligen technologischen Zwängen, die bisher Programmierung stranguliert haben. Programmieren als Kalkül wird insbesondere überall t unentbehrlich, wo Programmierfehler unerträglich sind, so in sensitiven Bereichen politier, militärischer und medizinischer Natur, oder aus ökonomischen Gründen, wie bei der Auseitung von Schaltungen, die in grossen Serien gefertigt werden.

Informatische Maschinen

anziehend mancher Informatiker das abstrakte Spiel mit Algorithmen und Strukturen finden g: es dient letztlich doch der Durchführung *konkreter* Aufgaben auf informatischen Maschiı. Im Gegensatz zu den Kraftmaschinen, die die erste industrielle Revolution mit sich brach-, sind die informatischen Maschinen energetisch sehr genügsam. Zwar brauchte unsere inchner PERM als Röhrenmaschine im Jahre 1955 noch mehr Strom als ein Bauerndorf, aber ; war nur eine Kinderkrankheit; heute kann die gleiche Rechenleistung energetisch mit Solarlen erbracht werden. Informatische Maschinen führen zu keiner Umweltverschmutzung, sie ssen in schöne Landschaften.

Informatische Maschinen haben die Aufgabe, Algorithmen auf Strukturen auszuführen. Sie nnen hierbei so ineffizient sein wie die lediglich zu theoretischen Zwecken dienende «Turingıschine» oder so effizient wie die «von Neumann-Maschine», ein Baumuster, das sich über nmehr vierzig Jahre mit nur kleinen Abwandlungen gehalten hat. Der praktische Informatiker aucht jedenfalls Maschinen, um sein Brot verdienen zu können – ohne Hardware ist Software tzlos.

Maschinen haben zwei Seiten: einerseits ihren inneren Aufbau, andererseits ihr äusseres Verılten, wenn sie als «schwarzer Kasten» aufgefasst werden.

Vom inneren Aufbau her haben wir Maschinen schon als Beispiele für Strukturen angeführt. bstrakt spricht man von Schaltstrukturen. Der Abstraktionsprozess verleiht Unabhängigkeit von chnologischen Entwicklungen. Das bemerkte schon Zuse, der eine abstrakte Schaltkreisnotaon verwandte, als er von mechanischen Schaltgliedern zu elektromagnetischen überging und 43 Schreyers elektronische Lösungen ins Auge fasste. Schecher beschrieb 1969 einen Kleinrecher in ALGOL 68. Eine solche abstrakte Beschreibung der *Schaltung*, bis hinab zum letzten Bit, asst auf *eine* Seite.

I Rechenstrukturen: Strukturen zum Rechnen

'ir haben aber auch gelernt, das äussere Verhalten einer Maschine als «schwarzer Kasten» abrakt und formal zu erfassen mit dem Begriff einer Rechenstruktur, einem Konglomerat von Reıenoperationen und Objektstrukturen, das lediglich durch die Eigenschaften ihres Zusammeniels gekennzeichnet ist – Eigenschaften, die man etwa in der Form von Gleichungen abfasst.

Wiederum braucht man für eine abstrakte Beschreibung, diesmal aber des *Verhaltens* eines leinrechners, nur eine halbe Seite. Der mathematische Hintergrund dieses Ansatzes, Rechenukturen als endlich erzeugbare Modelle solcher abstrakter Spezifikationen aufzufassen, führt ausgeprägt algebraischer Denkweise. Es entwickelt sich derzeit eine starke Bindung zwischen formatik und Algebra, die neben die schon klassische zwischen Informatik und Logik (und die :niger oft beschworene, aber ebenfalls fruchtbare zwischen Informatik und Verbandstheorie) tt.

Es wird also künftig möglich sein, dass Informatiker nicht nur Algorithmen beschreiben, sonrn auch die Charakterisierung der Maschinen, für die diese Algorithmen bestimmt sind, festlen. Die Nutzanwendung einer souveränen Handhabung der Abstraktion wird vor allem im Zummenhang mit der Mikrominiaturisierung und dem zunehmenden Trend zum individuelleren u von Rechenanlagen zu finden sein: Wir können auf diesem Weg gut durchorganisierte, proımmierungsfreundliche Rechenanlagen erhalten, die optimal angepasst sind. Dies führt zu ei-

ner allmählichen Abkehr vom Konzept der «von Neumann-Maschine» und wird tief in den architektonischen Aufbau der Maschinen eingreifen.

12 Schluss

Der Dreiklang meines Vortrags lautet: Algorithmen, Strukturen, Maschinen. – Die Synthese beginnt sich abzuzeichnen: So wie Strukturen gefrorene Algorithmen sind, sind informatische Maschinen lebendige Algorithmen, die Strukturen verändern.

Was aber das Seitenthema betrifft: Ein weiter Weg war zu gehen, bis technologischer Fortschritt für viele Menschen die Befreiung von der Last eintöniger geistiger Tätigkeit brachte. Wie immer, übertreibt die Menschheit auch hier: Es gibt Leute, die sagen, man brauche nun in der Schule das Rechnen nicht mehr zu lernen. Dahinter kann die teuflische Absicht stehen, der Menschheit allmählich auch das Denken abzugewöhnen – für Ideologen und Diktatoren wahrlich schöne Aussichten.

Das Gegenteil wird jedoch durch die Freisetzung des Menschen von der Routine bewirkt: Er gewinnt Zeit und behält Energie, um sich stärker der wahren Mittel des Geistes, der Inspiration und der Intuition, zu bedienen. Computer sollen dem Menschen helfen, sich in komplexen Situationen zurechtzufinden. Den *Computer* nicht zum mystischen Gegenstand werden zu lassen, ist unsere Aufgabe. Die Fachleute trifft die Verpflichtung, neben ihrem beruflichen Fortschrittsglauben solide staatsbürgerliche Verantwortung zu zeigen und auch der Öffentlichkeit gegenüber zu vertreten – einer *breiten* Öffentlichkeit, die auf das Urteil der Fachleute angewiesen ist. Dann wird man nicht glauben, Computer seien ein Allheilmittel.

Die Fachgenossen und eine *interessierte* Öffentlichkeit sollten sich indessen vor Augen halten, dass es Grenzen des Verstandes gibt. Die Logik hat mit den Gödelschen Resultaten erstmals Grenzen der Beweisbarkeit aufgezeigt; im Verfolg dieser Ergebnisse gibt es auch Grenzen der Algorithmisierbarkeit. Es gibt Problemklassen, die zu umfangreich sind, als dass ein einziger Algorithmus oder auch endlich viele, noch so allgemeine Algorithmen eine Lösung für die gesamte Klasse bringen könnten. Das Programmieren als allgemeine Aufgabe gehört übrigens dazu.

Je mehr wir also mechanisieren, automatisieren, algorithmisieren, um so mehr werden Inspiration und Intuition auch künftig erforderlich sein, um den Erkenntnisdrang des Menschen zu stillen. Nach wie vor hat der Geist Vorrang vor dem Golem. Ich möchte das dadurch unterstreichen, dass ich zum Schluss einer Computergrafik entgegenstelle das Bild der Rosette des Nordfensters im Querschiff von Notre-Dame in Paris.

Zudem möchte ich bemerken, dass nicht einmal das für die Informatik so fruchtbare Binärprinzip auf jede Lebenslage übertragen werden muss. Gerade die moderne Logik beschränkt sich nicht auf Zweiwertigkeit: modale Logiken finden neuerdings nützliche Anwendungen. Und im Zusammenleben der Menschen kommt man mit blossem Ja oder Nein nicht aus; die Wahrheit und die Liebe erfordern meist eine subtilere Antwort, die man mit Algorithmen allein nicht findet.

Prof. Dr. Dr. h.c. F.L. Bauer, Institut für Informatik T. U. München, Postfach 202420, D-8000 München.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/2: 157–161

Evolutionäre Erkenntnistheorie – eine Polemik

Beitrag von Prof. Dr. Gereon Wolters in Heft 3/1988

Anmerkung des Redaktors:
Der oben erwähnte Beitrag von Prof. Wolters hat rege Beachtung gefunden. Es ist für den Redaktor der Vierteljahrsschrift ermutigend zu wissen, dass eine kritische Leserschaft hinter ihm steht. Es werden nachfolgend zwei Repliken und eine Duplik veröffentlicht. Damit soll die Diskussion zu diesem Thema in unserer Zeitschrift vorerst abgeschlossen sein.

Replik von Prof. Dr. H. H. Keller, Universität Zürich.

1 Vorbemerkung

Der im September-Heft 1988 dieser Zeitschrift (133/3: 125–142) erschienene Artikel, in dem Gereon Wolters von philosophischer Seite einen Generalangriff gegen die Evolutionäre Erkenntnistheorie (EE) führt, fordert eine Entgegnung heraus. Dies soll hier in aller Kürze geschehen.

Bei Wolters' Einwänden gegen die EE ist zu unterscheiden zwischen solchen, die unseren angeborenen «ratiomorphen Apparat», und denjenigen, die unsere wissenschaftliche Erkenntnisfähigkeit betreffen. Die ersteren nun beziehen sich gar nicht spezifisch auf die kognitiven Strukturen, sondern zielen auf Evolutionsmechanismen im allgemeinen. Die letzteren hingegen berühren das schwierige Problem der «Überformung» der genetischen Evolution durch die Kulturentfaltung, dessen (neuro-)biologischer Aspekt das Verhältnis von genetischer Determiniertheit des Gehirns zu seiner epigenetischen Entfaltung im Lernprozess ist.

2 Die EE hat philosophische Konsequenzen

Die EE ist die Anwendung der biologischen Evolutionstheorie auf die Vorstufen des Erkenntnisvermögens bei Tieren und die eigentliche Erkenntnisfähigkeit des Menschen. Sie besagt, dass sich der Erkenntnisapparat der Organismen – im Prinzip nicht anders als andere Organe auch – in der Phylogenese herausgebildet habe. Die EE ist damit eine Folgerung des Evolutionskonzeptes der Biologie.

In Anwendung auf den Menschen hat die EE, die primär eine naturwissenschaftliche Theorie ist, durchaus philosophische Konsequenzen, indem sie alte Streitfragen entschärft. So hebt sie den klassischen Gegensatz zwischen Rationalismus und Empirismus auf, indem sie die Kantschen «synthetischen Apriori» naturalistisch deutet, nämlich als stammesgeschichtlich erworbene Erkenntnisstrukturen. Diese sind also zwar apriorische Voraussetzungen jeden individuellen Erfahrungserwerbs, doch aber aposteriorische Produkte der genetischen Evolution.

Darüber hinaus ist die EE weltanschaulich relevant. Indem sie im menschlichen Geist ein Evolutionsprodukt erkennt, wird dieser von seinem Anspruch befreit, neben oder gar über der Materie zu stehen. Und das menschliche Selbstverständnis wird – nach der Kopernikanischen Revolution und dem Darwinismus – ein weiteres Mal erschüttert. Darin ist wohl eine Hauptquelle des Widerstandes zu erblicken, auf den die EE auch heute noch vielfach bei geisteswissenschaftlich orientierten Philosophen stösst.

3 Die EE und die Evolutionsmechanismen

Wie eingangs erwähnt, wendet sich Wolters mit seinem Artikel gegen die EE. Schon in seiner Zusammenfasssung heisst es: «In diesem Papier wird argumentiert, dass der evolutionär erkenntnistheoretische Ansatz zirkulär und ‹metaphysisch› ist. Ferner ist er begrifflich ungenügend und vertritt eine obsolete Variante des Darwinismus, der Beliebiges evolutionär zu ‹erklären› vermag (‹Panglossismus›).» Und gegen den Schluss der Arbeit liest man «Resümierend lässt sich sagen, dass das eigentliche Fundament der evolutionären Erkenntnistheorie auf wackeligen Beinen steht, wenn nicht gar unhaltbar ist. Sie ist ein hochspekulatives Unternehmen.»

Soweit sich die von Wolters vorgebrachten Argumente auf den angeborenen «ratiomorphen Apparat» der Lebewesen beziehen, könnten sie genausogut auf andere Organsysteme angewendet werden; sie sind daher nicht spezifisch erkenntnisrelevant, sondern greifen in die Diskussion um die Evolutionsmechanismen im allgemeinen ein.

Wenn Gereon Wolters bei der von ihm selbst als «vulgär-darwinistisch» bezeichneten Verzerrung des Evolutionsgedankens einhakt und damit glaubt, die EE zu erledigen, macht er es sich etwas leicht. Es ist doch allgemein bekannt, dass jede biologische Form sich aus einer früheren – nicht aus dem Nichts – entwickelt hat, dass demgemäss kein Organismus eine völlige Neukonstruktion, sondern durch Umbau und/oder Umfunktionierung von einzelnen Teilen entstanden ist, dass Anpassungen stets Kompromisse zwischen optimaler Funktionalität und schon vorgegebenen materiellen Bedingungen (Bauplänen) sind und daher kaum je optimal ausfallen. Jedenfalls ist Evolution, weder per definitionem noch dem Inhalte nach, identisch mit Anpassung.

Was auch immer im einzelnen die Mechanismen der biologischen Evolution gewesen sein mögen, so ist der angeborene Erkenntnisapparat der Lebewesen, inklusive des Menschen, eines ihrer Produkte – was denn sonst?

4 Das menschliche Gehirn und die Kulturentfaltung

Der von Wolters gegen die EE vorgebrachte Einwand, der am meisten Aufmerksamkeit verdient, von ihm aber nur kurz angeschnitten wird, betrifft das Problem, wie es der Mensch mit seinem «Steinzeitgehirn» (Vollmer) fertigbrachte, schliesslich wissenschaftliche Leistungen zu vollbringen, die weit über die Bedürfnisse hinausgehen, für die es seinerzeit evoluiert wurde. Den hier auftauchenden scheinbaren Widerspruch benutzt Wolters als ein Argument gegen die Thesen der EE.

Nun liegt der Kulturentfaltung der Menschheit seit Beginn des Holozäns, schon aus zeitlichen Gründen, kaum eine makroevolutive Entwicklung zugrunde – wenn die Mikroevolution auch während der geschichtlichen Epochen natürlich weiterging –, sondern ein epigenetischer Mechanismus, wie wir ihn in der postnatalen, ausseninduzierten Reifung des individuellen menschlichen Gehirns antreffen, beruhend auf zunehmend komplexeren Verschaltungen des (phylogenetisch gewordenen) Erkenntnisapparates im Laufe des Lernprozesses. Die in der Phylogenese des menschlichen Gehirns hervorgebrachte ausserordentliche Versalität des Verhaltens dank einem weit offenen Programm konnte für das Überleben des pleistozänen Menschen nur von Vorteil sein. Wir brauchen uns nur zu vergegenwärtigen, welch mehrfachen Wechsel die gesamte Fauna und Flora während des Pleistozäns erfuhr, wohingegen der Mensch diese für uns kaum vorstellbaren Umweltveränderungen nicht nur erfolgreich überstand, sondern sich gleichzeitig über die ganze Erde ausbreitete. Wahrscheinlich unterschätzt Wolters die Intelligenz, deren unsere späteiszeitlichen Vorfahren dazu bedurften.

Die in der Kulturgeschichte sich entfaltende Leistungskraft des Menschengehirns kann nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch dieses Organ ein Produkt der biologischen Evolution ist. Sein gewaltiges potentielles Leistungsvermögen ist offenbar bedingt durch die unermessliche Vielfalt von neuronalen Netzwerken, die möglich wurden, nachdem einmal bei der Entstehung des Grosshirns weite Bereiche synaptischer Verschaltung aus der (phylo-)genetischen Determination entlassen und der umwelt- und lerninduzierten Epigenese anheimgestellt worden waren. Durch diese «Erfindung» der Selbstorganisationsfähigkeit des Neocortex' hatte die Evolution wieder etwas völlig Neues in die Welt gesetzt: den Menschen.

5 Schluss

Wolters' Kritik ist rein negativ. Er hat nicht die Spur einer alternativen Lösung oder Idee anzubieten. Dass seine eigentlichen Motive ausserwissenschaftlicher Natur sind, lässt sich vermuten, wenn man sein Credo zur Kenntnis nimmt: «Gegen das von evolutionären Erkenntnistheoretikern ‹Entanthropomorphisierung› genannte Programm möchte ich eine konsequente Anthropomorphisierung empfehlen, die sich mit Kant an der Idee der Freiheit und der autonomen Selbstbestimmung orientiert.»

Wenn Gereon Wolters mit der «Anthropomorphisierung», die er uns empfiehlt, die Anerkennung der Sonderstellung des Menschen im Tierreich meint, so rennt er damit offene Türen ein und braucht deswegen gewiss nicht gegen die EE zu polemisieren. Tatsächlich bemüht sich erst die EE um ein wissenschaftliches Verständnis der kognitiven Seite der Menschwerdung.

Die Evolution unserer Welt hat immer wieder gänzlich neue Phänomene hervorgebracht. Die Entstehung des Lebens auf unserer Erde ist eine solche Neuschöpfung der Natur. Und im (zeitlich) letzten Promille der Evolution der Lebewesen ist die Emergenz der menschlichen Erkenntnisfähigkeit das überragende Ereignis auf unserem Planeten. Dies ist das Hauptthema der EE. Ihre kulturhistorisch bedeutsame Leistung besteht in ihrem Beitrag zur Klärung der uralten Grundfrage der Philosophie nach dem Verhältnis von Materie und Geist, nämlich in der Einsicht, dass dieser Dualismus ein menschliches Artefakt ist.

Replik von Prof. Dr. H. Burla, Universität Zürich.

Dass die Erkenntnisfähigkeit des Menschen auf den mesokosmischen Grössenbereich der Umwelt passt, nimmt in der Argumentation für die Evolutionäre Erkenntnistheorie (EE) einen breiten Raum ein. Offenbar verstehen ihre Anhänger beim darwinistischen Slogan «survival of the fittest» unter dem Wort «fit» das Passen, besser: eine Angepasstheit, Adaptation, und nehmen das Passen als Beweis für die These, dass die menschliche Erkenntnisfähigkeit auf der evolutiven Wirkung der natürlichen Selektion beruhe. Zum grösseren Teil richten sich die Bedenken Wolters' gegen diesen Vulgärdarwinismus, wie er ihn nennt. Seit langer Zeit ist eine solche naive Argumentation auch unter Biologen suspekt geworden. Viele Eigenschaften lebender Systeme, auch des Menschen, lassen sich nicht – oder oft nur vordergründig – als Anpassungen verstehen. Im engeren Sinne des Darwinismus bedeutet Fitness überhaupt nicht die Angepasstheit, sondern die Fertilität eines Phänotyps im Vergleich zur durchschnittlichen Fertilität der Population, der er angehört (beispielsweise hat J. A. Endler dies klargestellt im Buch «Natural Selection in the Wild», Monographs in Population Biology, Princeton 1986). Warum die Fertilität eines Phänotyps vom Durchschnitt abweicht, ist oft schwer zu ergründen. Die Schwierigkeit empfand schon Darwin, als er halbherzig mögliche Deutungen vorschlug. Dem Verständnis der Evolution scheint es entgegenzukommen, wenn eine offensichtliche Angepasstheit vorliegt. In jedem Fall muss man aber vorerst untersuchen, ob ein Phänotyp überhaupt systematisch von der durchschnittlichen Fertilität abweicht, bevor man sich allenfalls über seine mögliche Angepasstheit Gedanken macht. Gegenwärtig haben sich unter Darwinisten zwei Schulen herausgebildet: die der Adaptationisten und die der Nicht-Adaptionisten, wobei die letzteren Anpassungen ebenfalls wahrnehmen, aber als ausgewählte Schulbeispiele auffassen und im Stellenwert zurücksetzen.

Beim naturwissenschaftlichen Bemühen um ein biologisches Verständnis der Herkunft menschlicher Erkenntnisfähigkeit darf man annehmen, sie sei das vorläufige Endergebnis einer kontinuierlichen Vergrösserung des Gehirngewichts in der Hominidenreihe. Zum einen Teil wurde das Gehirn schwerer, weil der Körper grösser wurde, zu einem anderen Teil, weil sich der Körper aufrichtete, wobei die Hände zu vielfältigem Gebrauch frei wurden. Hierbei von Anpassung zu sprechen ist möglich, aber doch weit gesucht. Wir sollten mit der Annahme auskommen, dass im Durchschnitt ein grosses Gehirn mehr leistet als ein kleines, und dass folglich in der Hominidenentwicklung die Fitness mit der Gehirngrösse zusammenhing. Gewiss dürfte sich das Gehirn nicht nur vergrössert, sondern auch qualitativ geändert haben, indem beispielsweise einige Zen-

tren zu neuen Leistungen fähig wurden. Übrigens erweist sich die Leistungsfähigkeit eines Gehirns vor allem im epigenetischen Lernprozess, und in diesem Fall darf man wohl auch sagen, dass im Durchschnitt ein grosses Gehirn besser oder mehr lernt als ein kleines. Beim Menschen soll man in dieser Beziehung schon gar nicht von Anpassung reden, weil er die Fixierung auf die Umwelt überwinden kann und es am eindrücklichsten in Kunst und Wissenschaft tut. Der Mensch ist in seinen Leistungen ein Generalist, somit ein Paradebeispiel für Nicht-Adaptationisten. Indem Wolters den Vulgärdarwinismus ablehnt, kann er eine naturwissenschaftliche Deutung der Entwicklung der Erkenntnisfähigkeit keineswegs ausschliessen.

Die Angepasstheit der Erkenntnisfähigkeit an den mesokosmischen Grössenbereich der Umwelt darf kaum als Besonderheit des Menschen aufgefasst werden. Er hat sie geerbt von den phylogenetischen Vorfahren bis zurück zu den ersten Säugern und deren Vorläufern. Da alle diese im Mesokosmos lebten, bewährten sich schon bei ihnen die Sinnesorgane und das Nervensystem im Mesokosmos. Bei den gleichen Vorfahren können wir sogar die Ansätze der menschlichen Erkenntnisfähigkeit suchen (unter anderem dargestellt von D. R. Griffin im Buch «Wie Tiere denken / Ein Vorstoss ins Bewusstsein der Tiere», BLV Verlag 1984).

Mir scheint, die EE sei ein begrüssenswerter Schritt in eine aussichtsreiche Richtung. Sie wegen nebensächlicher Missverständnisse abzulehnen, wäre verfehlt.

Duplik von Prof. Dr. Gereon Wolters, Universität Konstanz

Die beiden Entgegnungen auf meinen Artikel «Evolutionäre Erkenntnistheorie – eine Polemik» bieten die dankenswerte Möglichkeit, ohne ins Detail zu gehen noch einmal einige Punkte zu verdeutlichen, die in diesem Artikel vielleicht nicht klar genug ausgedrückt sind.

1) Es gibt keinen vernünftigen Zweifel daran, dass die organismischen Formen im Prozess der Evolution auseinander entstanden sind. Zu bezweifeln aber ist die Ansicht der kritisierten evolutionären Erkenntniskritiker, dass sich Strukturen oder Funktionen eines Organismus ohne weiteres als Anpassungen darstellen lassen. Anders gesagt: Nicht die *Tatsache* der Evolution steht zur Diskussion, sondern eine bestimmte *Theorie* (eben der kritisierte «panglossistische» Adaptionismus), welche die Tatsache der Evolution erklären soll, sowie die aus dieser Theorie gezogenen erkenntnistheoretischen Folgerungen. Professor Burla wendet sich in seinen «Bemerkungen» ebenfalls zu Recht gegen den der evolutionären Erkenntnistheorie zugrundeliegenden Adaptionismus.

2) Das menschliche Gehirn ist wie alle anderen Organe ein Evolutionsprodukt. Als ein solches kann es in seiner Struktur wie auch in seinen Funktionen durchaus einer evolutionsbiologischen Betrachtungsweise unterzogen werden. Bestritten wird lediglich, dass die Strukturen und Funktionen des Gehirns Anpassungen darstellen, solang hierfür kein einigermassen schlüssiger Nachweis erbracht ist. Es wurde dafür argumentiert, dass eben dieser Nachweis in den kritisierten Punkten bislang nicht erbracht wurde. Natürlich fallen mit dem Adaptionismus auch die angeblichen erkenntnistheoretischen Konsequenzen, die aus dieser ziemlich unhaltbaren Hypothese gezogen werden. Abgesehen von dieser Abhängigkeit der evolutionären Erkenntnistheorie von einer schwachen oder gar unhaltbaren Form der Evolutionstheorie weisen die von mir kritisierten Positionen der evolutionären Erkenntnistheorie zusätzlich erhebliche «interne» Mängel auf.

Generell ist eine evolutionäre (wenn auch nicht adaptionistische) Untersuchung unseres Erkenntnisvermögens ebenso wünschenswert wie z. B. eine psychologische oder entwicklungsbiologische. Solche natur- oder exaktwissenschaftlichen Untersuchungen sind auch für eine philosophische Erkenntnistheorie von klärendem Nutzen. Sie werden jedoch die philosophischen Fragen der Erkenntnistheorie nie beantworten oder ersetzen können. Von der Aufgabe, auf positive Gesichtspunkte evolutionärer Erkenntnistheorie einzugehen, die auch aus philosophischer Sicht gewiss bestehen, wurde durch die Darstellungsform der Polemik Dispens genommen.

3) Ohne geisteswissenschaftlich orientierte Philosophie herabsetzen zu wollen, sei bemerkt, dass ich selbst von der Mathematik und Biologie herkomme. Die Polemik gegen die evolutionäre Erkenntnistheorie verfolgte zwei Ziele: a) ein wissenschaftstheoretisches, b) ein anthropologisch-gesellschaftsphilosophisches. Wissenschaftstheoretisch ging es um Argumente dafür, dass eine

bestimmte Form der Evolutionstheorie wohlbegründeten methodologischen Anforderungen an naturwissenschaftliche Theoriebildung nicht genügt. In anthropologischer Hinsicht wurde der untaugliche Versuch kritisiert, menschliches Selbstverständnis aus bröckelnden naturwissenschaftlichen Bausteinen aufzubauen. Naturwissenschaftliches Wissen vom Menschen gehört gewiss zu einem angemessenen menschlichen Selbstverständnis. Niemand wird es deswegen zurückweisen dürfen, weil es nicht mit irgendwelchen schmeichelhaften Prätentionen über das «Wesen des Menschen» in Einklang zu bringen ist. Nur darf es sich bei naturwissenschaftlichen, speziell biologischen Beiträgen zu unserem Selbstverständnis nicht um Scheinwissen handeln. Den Kern menschlichen Selbstverständnisses bildet aber nicht das Wissen um unsere biologische Natur oder sonstiges wissenschaftliches Wissen. In seinem Kern ist unser Selbstverständnis vielmehr das Ergebnis unserer freien, selbstverantwortlichen und in wesentlichen Teilen normativen Konstruktion. Das ist in der Tat «ausserwissenschaftlich» und wird es immer bleiben. In diesem Sinne wurde von «Anthropomorphisierung» gesprochen. Freilich ist «ausserwissenschaftlich» nicht gleichbedeutend mit «irrational». Auch die Konstruktion menschlichen Selbstverständnisses ist eine rationale, auf Argumenten aufbauende Angelegenheit. Bei dieser – im übrigen weithin sozialen – Konstruktion sind gewiss die Grenzen zu beachten, welche uns unsere biologische Natur zieht. Solche Grenzziehungen aber müssen bessere biologische und andere wissenschaftliche Theorien leisten als der Adaptionismus der evolutionären Erkenntnistheorie.

Buchbesprechungen

Herbert Reisigl und Richard Keller: Alpenpflanzen im Lebensraum. Alpine Rasen, Schutt- und Felsvegetation. Vegetationsökologische Informationen für Studien, Exkursionen und Wanderungen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1987. 149 S. DM 32.–.

Paul Ozenda: Die Vegetation der Alpen im europäischen Gebirgsraum. Aus dem Französischen übersetzt von Hannes Mayer und Andreas Zirnig. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1988. 353 S. DM 78.–.

Von den zwei neuen Büchern über die Vegetation der Alpen stammt das eine aus Innsbruck und geht von den Vegetationserfahrungen in ostalpinen Verhältnissen aus. Das andere entstand in Grenoble und basiert auf einem vorwiegend westalpinen Blickwinkel. Beide Werke sind keine eigentlichen «Alpenfloren», die dem Laien das Erkennen von Alpenblumen ermöglichen. Sie vermitteln vielmehr wissenschaftliche Kenntnisse über die Beziehungen der Vegetationen zur Umwelt im weitesten Sinne. Schwerpunkt des Werkes von Reisigl und Keller bilden Wuchsformen und Ökophysiologie der Pflanzen in der alpinen Stufe; bei Ozenda liegt die Biogeographie und die Vegetationsgliederung des gesamten Alpenbogens mit Vergleich zu den Nachbargebirgen im Mittelpunkt. Die beiden Bücher überlappen nur wenig, sie ergänzen sich in vorzüglicher Weise und vermitteln eine ansprechende Übersicht über die vielgestaltigen und faszinierenden Aspekte der Alpenvegetation.

Das Ziel des Buches «Alpenpflanzen im Lebensraum» wird von den beiden Autoren Reisigl und Keller folgendermassen umschrieben: «... Durch die Zusammenschau von Erkenntnissen aus [illegible] Arbeitsgebieten [illegible] Buche Anregungen geben [illegible] Nachdenken [illegible] Zusammenhänge [illegible] den Alpen [illegible] gehalten [illegible] braucht es [illegible] wissenschaftlich [illegible] Nach [illegible] angesehen [illegible] der Alpen

werden Lebensformen und Höhenstufung dargestellt. Den Hauptteil des Buches bilden die Beschreibungen der wichtigsten alpinen Pflanzengesellschaften und der nivalen Vegetation, unterbrochen von einem Kapitel über Bestandesstruktur, Bioklima und Boden in sieben Lebensbereichen der alpinen Stufe. In Fortsetzung der Tradition von Carl Schröters «Pflanzenleben in den Alpen» stehen die Wuchs- und Lebensformen und das ökophysiologische Verhalten der alpinen Pflanzenarten im Vordergrund. Dabei konnten sich die Autoren auf die reichhaltigen neuen Forschungsergebnisse der traditionsreichen pflanzenphysiologischen und ökologischen Forschung in Innsbruck stützen.

Das Buch ist in der Aufmachung ansprechend, enthält 189 ausgezeichnete Farbphotos von Vegetationen und Einzelarten sowie 144 instruktive und originelle, oft aus vielen Einzelbildern zusammengesetzte Zeichnungen und graphische Darstellungen. Der erklärende Text ist allerdings bei vielen Darstellungen zu knapp geraten, so dass das Verstehen der an und für sich anschaulichen Abbildungen für den Leser mit wenig Vorkenntnissen teilweise mühsam ist. Insgesamt liegt aber ein erfreuliches, informatives und anregendes Buch vor, das sich vorzüglich zur Weiterausbildung für Biologiestudenten und naturbegeisterte Pflanzenfreunde eignet.

Das Werk von P. Ozenda über «Die Vegetation der Alpen im europäischen Gebirgsraum» wurde vom Forstprofessor Hannes Mayer aus Wien und vom Dolmetscher Andreas Zirnig aus dem Französischen in die deutsche Sprache übersetzt. Dass die fachliche Betreuung der Übersetzung bei einem Forstmann lag, deutet bereits darauf hin, dass im Unterschied zum Werk von Reisigl und Keller der Wald eine zentrale Stelle in diesem Buch einnimmt. Ziel des Autors war die Ausarbeitung eines allgemeinen biogeographischen Alpenmodells, das [illegible] auf der Vegetation und unter [illegible] aller bekannten historischen, klimatischen und edaphischen Faktoren [illegible] das Modell teilweise erfolgreich auch auf benachbarte Gebirge angewendet werden. Das Buch gibt einen Überblick über die [illegible] in den verschiedenen [illegible] der Alpen, vom Tiefland bis auf die [illegible]. Die Alpen werden biogeographisch [illegible] Zonen und zwei [illegible] Zonen, wobei die

ı Zonen nochmals in bis zu sieben
heiten gegliedert sind. Die Vegetatio-
len in fünf Stufen und rund 30 Serien
ıngefasst. Die Serie, ein ursprünglich
iaussen in Toulouse geprägter Begriff,
ıt die Gesamtheit der Vegetationen in
limaxgebiet (Klimax ist die unter ei-
ısklima entstehende Vegetation), also
ızengesellschaften, die durch progres-
wicklung zur Klimax tendieren, und
ene, die durch Degradation (z. B. un-
menschlichen Einwirkungen) davon
ıt werden können. Mit Hilfe dieser Se-
der geographischen Unterteilung er-
Leser einen anschaulichen Überblick
: pflanzengeographische und vegeta-
dliche Vielfalt der Alpen. Dabei wer-
ı viele ökologische Beziehungen auf-

Buch ist vorzüglich mit instruktiven
und Abbildungen ausgestattet. Es
ch für Botaniker, Forstleute und Öko-
m vertieften Einstieg in pflanzengeo-
h-vegetationskundliche Probleme und
sondere hilfreich als fachliche Unter-
botanisch-ökologische Exkursionen in
chiedenen Alpenregionen.

Elias Landolt

:: Systematik in der Biologie. 181 Sei-
45 Abbildungen. UTB-Nr. 1502, Gu-
Fischer Verlag, Stuttgart 1988. Preis
24.80.

r diesem vielversprechenden Titel legt
ein Bändchen der UTB-Reihe «Biolo-
, das im wesentlichen ein – auch für
htfachmann verständliches – Konzen-
ìeinem vielbeachteten Buch «Das Phy-
ıche System. Systematisierung der le-
Natur aufgrund ihrer Phylogenese»
ı darstellt.
ıs Phylogenetische System baut auf
ırgerüst des sog. Kladismus auf, einer
Linie von Hennig 1950 formulierten
eitung zur Bewertung von Merkmalen
ıer systematischen Relevanz, entspre-
ın Kriterien «ursprünglich», «abgelei-
: «neu erworben». Ob der Kladismus
auchbaren Weg zu einem System dar-
s stammesgeschichtliche Beziehungen
ı Formen und Gruppen zum Ausdruck
der nicht, darüber gehen die Meinun-
ıer noch weit auseinander. Prominen-
ten Befürwortern stehen ebenso prominente Gegner gegenüber, und diese als «aufgeschreckte, konservative Kombattanten» abzutun, wie dies im Vorwort geschieht, ist ein starkes Stück.

Dennoch, auch wer nicht auf dem Boden des Kladismus steht, muss dem Bändchen attestieren, dass es, brillant geschrieben, in prägnanter Form und mit sauberer Logik darlegt, was der Autor unter seiner Phylogenetischen Systematik versteht und was er damit will. Klare Definitionen und Illustrationen erläutern nicht nur seinerzeit von Hennig geschaffene Begriffe wie Autapomorphie, Synapomorphie und Symplesiomorphie, sondern auch jene oft missverstandenen der klassischen Homologielehre und der Stammesgeschichte ganz allgemein.

Das neue Buch ermöglicht dem Interessierten einen guten Einstieg in die Problematik und Terminologie zoologischer Systematik; dass der Autor dabei kompromisslos als Protagonist einer bestimmten Denkrichtung auftritt, erachte ich eher als einen Vorteil: Klar und erschöpfend wird hier ein wissenschaftliches Denksystem präsentiert, an welchem sich Befürworter orientieren und Gegner organisieren können.

Vincent Ziswiler

G. Jurzitza, Anatomie der Samenpflanzen, 293 Seiten, 183 Abbildungen, 376 Einzeldarstellungen, 4 Tabellen. Flexibles Taschentuch, Thieme Verlag, Stuttgart, DM 36.–.

Die «Anatomie der Samenpflanzen» richtet sich an Studenten fortgeschrittener Semester und ist als weiterführender, auf die Grundlagen aufbauender Studientext gedacht. Er spricht also jene Studenten, Forscher und Lehrer an, die sich innerhalb ihres Studiums oder ihrer Arbeit intensiver mit der Struktur der Samenpflanzen auseinandersetzen müssen. Die Grundbegriffe werden vorausgesetzt und sind nur noch kurz im Text erklärt. Ein vergleichbar erschwingliches Werk ist bis heute im deutschen Sprachraum nicht erhältlich.

Das Buch ist in die zwei Kapitel Histologie und Anatomie aufgeteilt; es geht also von der einfachen zur komplizierten Organisationsstufe über. Allerdings wäre hier eine den Wortinhalten und den Gepflogenheiten entsprechende Hierarchie erwünscht. Danach wäre die Anatomie (Lehre vom inneren Bau der Organismen) der Histologie (Gewebelehre) nicht

gleichgesetzt, sondern übergeordnet, und die Morphologie (Lehre vom äusseren Bau der Lebewesen, Gestaltlehre) dürfte nicht nur in einigen Unterkapiteln des zweiten Abschnittes zum Zuge kommen.

Abgesehen von dieser Einteilung ist das als Lehrbuch konzipierte Buch in den Unterkapiteln didaktisch sehr gut aufgebaut. Am Ende jedes Kapitels wird es dem Leser ermöglicht, durch einige Kontrollfragen sein Wissen zu überprüfen; die Antworten darauf sind mit Hilfe des Indexes rasch im Text auffindbar. Die Erarbeitung und das Verständnis des gebotenen Stoffes werden durch eine Fülle von lichtmikroskopischen und EM-Bildern erleichtert. Sie sind von vorzüglicher Qualität und stammen zum grossen Teil vom Verfasser selber. Dort, wo es darum ging, Prozesse oder Zusammenhänge aufzuzeigen, geschah dies vorwiegend durch Fotoserien oder Zeichnungen. Bilder mit ihrem grossen Informationsinhalt ersparen auf diese Weise viele Seiten, den Leser ermüdenden Text. Die Angaben der deutschen Pflanzennamen zu den lateinischen würde das Buch noch benützerfreundlicher machen; auch eine Skizze der verwendeten Pflanzensystematik würde das Arbeiten erleichtern, denn je nach Autor variieren die Zuordnungen leicht, und im Text werden wiederholt Angaben zur Phylogenie gemacht. Das Lernen und Arbeiten werden ganz entscheidend durch ein Glossar, ein Literaturverzeichnis und einen ausführlichen Index am Ende des Buches unterstützt. Das Glossar enthält die sprachliche Ableitung der verwendeten Fachausdrücke und ermöglicht vor allem jenen Benützern ein grundlegenderes Verständnis, die der alten Sprachen nicht mehr kundig sind. Aus dem Literaturverzeichnis kann ein interessierter Leser leicht die einschlägigen Standardwerke entnehmen, und er findet über die aktuellen Publikationszitate auch ohne weiteres den Zugang zur speziellen Fachliteratur.

Erfreulich ist die Tatsache, dass innerhalb des Spross-Abschnittes dem Thema Holz ein ganzes Kapitel gewidmet wurde, kommt doch dieses Thema in den Lehrbüchern eher zu kurz. Die Darstellung der (Farb-)Kernholzbildung, der (Mark-)Strahlen und der Reaktionsholzbildung fielen jedoch eher unbefriedigend aus. Zug- und Druckholz kommen z. B. nicht nur an Ästen, sondern auch im Stamm vor und sind eher von (wirtschaftlicher) Bedeutung. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Werke von T. E. Timell, Compression Wood, 1986, und auf H. H. Bosshard, Holzkunde, 1982, verwiesen.

Das Buch kann dem Leser trotz der erwähnten Mängel empfohlen werden.

Livia Bergamin Strotz

[H]inweise für Autoren

1 Manuskript

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle ...).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild ...) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

**Vierteljahrsschrift der
Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 134, Heft 2, Juni 1989**

Inhalt

Preis: Fr. 20.–

Heft 3
Jahrgang 134
September 1989

VIERTELJAHRSSCHRIFT DER NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind von der Aktuarin der Naturforschenden Gesellschaft, *Frau Elisabeth Rufener, Baltenswilerstrasse 28, 8303 Bassersdorf,* zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 75.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt,* das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich).* – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042–5672

ierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/3: 165–174

ientechnologie bei Pflanzen [1]

ıgo Potrykus, ETH Zürich

ı den vergangenen Jahren sind Methoden entwickelt worden, welche die Möglichkeit eröffnen, olierte Erbfaktoren (Gene) in somatische Pflanzenzellen zu übertragen, und aus diesen geneıch veränderten Zellen vollständige Pflanzen zu regenerieren. Diese Pflanzen unterscheiden sich ın den Ausgangspflanzen in der Regel nur in dem neuen, durch das übertragene Gen bedingte erkmal. Das Fremdgen kann aus einer Pflanze oder aus anderen Organismen stammen. Sobald in das Erbgut der Pflanzenzelle integriert ist, verhält es sich genau so wie ein Gen der Wirtslanze. Das Fremdgen kann auch vor der Übertragung gezielt verändert werden, z. B. durch Änrung der Steuersignale, die darüber entscheiden, wo und wann das Gen aktiv wird. Gentechnogie bietet damit die Möglichkeit, Pflanzen sehr gezielt zu verändern. Dies wird von einem Teil r Bevölkerung als Chance, von einem anderen Teil als Gefahr gesehen. Vermutlich wird beides ›ertrieben. Gefahren auf der Grundlage transgener Pflanzen sind schwer zu erkennen, und die löglichkeiten der Verbesserung von wichtigen Pflanzen bewegen sich in engen Grenzen.

ene Technology with Plants

lethods have been developed during the recent years which open up the possibility to transfer olated genes into somatic plant cells and to regenerate subsequently complete plants from these enetically altered cells. Such "transgenic" plants differ normally from the original plants only ith regard to the novel character caused by the gene added. The "foreign" gene can originate ither from a plant or from other organisms. As soon as it is integrated into the genome of the aceptor cell it behaves exactly like other original genes of the host plant. The foreign gene can also e changed prior to its transfer, e. g. by an alteration in the regulatory signals which decide where nd when in the plant the gene will be activated. Gene technology thus offers possibilities for preise and predictable alterations of plants. This is understood by part of the population as great ›pportunity, by others as a big danger. Both views probably exaggerate. It is rather difficult to onstruct dangers on the basis of transgenic plants, and the possibilities for plant improvement ia gene technology are rather limited.

l Vorbemerkungen

l.1 Pflanzenzellen sind totipotent

Zellen in den unterschiedlichsten Geweben aller Grundorgane höherer Pflanzen (Blatt, Wurzel, Spross) können, bei einer ganzen Vielfalt von Arten und rotz abgeschlossener Differenzierung, noch über die Fähigkeit verfügen, zu einer vollständigen Pflanze heranzuwachsen. Dieses Phänomen der Totipoenz von Pflanzenzellen ist experimentell tausendfach bestätigt worden. Es beveist, dass die Regulation der Entwicklung bei Pflanzen nicht durch Genverust, sondern über deren reversible Aktivierung und Inaktivierung erfolgt. Es rlaubt ferner die Folgerung, dass jede einzelne Pflanzenzelle die gesamte Erbinformation der Pflanze enthält. Und es eröffnet die experimentelle Mögichkeit, einen so komplexen und vielzelligen Organismus wie eine höhere

[1] Vortrag vom 28. November 1988 vor der Naturforschenden Gesellschaft Zürich. – Der Text ird auch aufgenommen in die Publikation von Maja Svilar und Richard Braun (Hrsg.): Genchnologie. Chance oder Bedrohung. Verlag Peter Lang, Bern (im Druck), in der Reihe: Kulturistorische Vorlesungen des Colloquium generale der Universität Bern.

Pflanze dadurch in allen Hunderten von Millionen Zellen genetisch zu verändern, dass man eine einzige Zelle verändert und daraus eine ganze Pflanze regeneriert.

1.2 Das Erbgut einer Pflanze entspricht einer Bibliothek mit 50 000 Seiten

Die Erbinformation einer Pflanze ist, wie die eines jeden Organismus, niedergeschrieben in Form einer Schrift mit chemischen Buchstaben. In der Reihenfolge der Buchstaben ist die Information über alle Merkmale der Pflanze und über die zeitliche und räumliche Aktivierung dieser Eigenschaften im Verlauf der Entwicklung niedergelegt. Ausschnitte der Erbinformation sind entziffert worden und können in Form einer Buchstabenschrift wiedergegeben werden. Die gesamte Information einer Zelle würde ca. 50 000 dicht beschriebene Seiten vom Format DIN A4 füllen. Einzelne Erbfaktoren sind in dieser Darstellung mehrere Zeilen bis etwa ½ Seite lang. Die Steuersignale für die Regulation der Erbfaktoren flankieren diese und sind in der gleichen Schrift verfasst.

1.3 Pflanzenzüchtung durch Kreuzung vermischt ganze Bibliotheken

Pflanzenzüchtung bemüht sich um die Verbesserung von Kulturpflanzen durch Kombination von Merkmalen aus verschiedenen Rassen. Die biologische Grundlage dafür ist die gezielte Kombination von geschlechtlichen Fortpflanzungszellen (Gameten) im Kreuzungsexperiment. Kreuzung führt nur zu fortpflanzungsfähigen Nachkommen, wenn sie zwischen sexuell verträglichen Individuen erfolgt. Dies hat zur Folge, dass Merkmale nur innerhalb einer Art kombiniert werden können. Kreuzt man nun z. B. eine Kulturpflanze mit einer nahe verwandten Wildpflanze, um ein wertvolles Merkmal aus der Wildpflanze in die Kulturpflanze zu übertragen (z. B. «Resistenz gegen Schadpilze»), dann führt dies unausweichlich dazu, dass die 50 000 Seiten Erbinformation der Wildpflanze mit den 50 000 Seiten Erbinformation der Kulturpflanze vermischt werden. Die resultierenden Pflanzen sind als Kulturpflanzen völlig unbrauchbar. Durch 8–10 Jahre benötigende Rückkreuzungsserien mit der Kulturpflanze und Auswahl interessanter Pflanzen aus Hunderttausenden von Nachkommen muss deshalb solange das Gemisch der Erbinformationen aussortiert werden, bis schliesslich eine Pflanze gefunden ist, die ausser den 50 000 Seiten der Kulturpflanze nur noch wenige Seiten der Wildpflanze enthält, natürlich einschliesslich der Seite mit der Information für die Pilzresistenz.

1.4 Pflanzenzüchtung mit Gentechnologie könnte mit einzelnen Sätzen arbeiten

Gentechnologie könnte (theoretisch) die Merkmalsübertragung vereinfachen, präzisieren, und in den Möglichkeiten erweitern, wenn es gelänge, die erfor-

lerlichen Methoden zu entwickeln. Die Strategie wäre einfach: Man isoliert us der Erbinformation der Wildpflanze nur den Satz (oder die Sätze) mit der nformation für die Pilzresistenz (a), überträgt nur diese Information in die 0 000 Seiten der Erbinformation einer Zelle der Kulturpflanze (b), und regeeriert aus dieser gezielt veränderten Zelle eine vollständige Pflanze. Da weler Genisolierung noch Genübertragung an biologische Schranken gebunden st, könnte man das gewünschte Gen aus jeder beliebigen Pflanze (ja sogar jeem beliebigen Organismus) isolieren, nicht nur aus einer nahe verwandten Vildpflanzenart. Und man könnte das gleiche Gen in jede beliebige Kulturflanze übetragen. Dies wäre alles prinzipiell möglich: Man hat Methoden ur Genisolierung, man verfügt über verschiedene Techniken der Genübertraung, und man hat bereits bei vielen Pflanzenarten aus Einzelzellen Pflanzen egeneriert. Trotzdem wäre dieses Experiment in der Praxis kaum durchführar. Es würde z. Zt. bereits an der Isolierung des Pilzresistenzgens scheitern. Möglicherweise würde es auch an der Genübertragung versagen. Und es könnte sogar an der Regeneration aus Einzelzellen fehlschlagen. Dass etwas jenerell technisch möglich ist, bedeutet leider bei weitem nicht, dass es in jelem konkreten Fall machbar ist. Ein paar Beispiele werden dies später deutich machen.

2 Gentransfer

2.1 Gentransfer ist bei weitem noch nicht bei allen Pflanzen möglich

Obwohl mehrere sehr wirkungsvolle Methoden für den Gentransfer in Pflanzen ausgearbeitet worden sind und an der Entwicklung weiterer, ergänzender Techniken gearbeitet wird, sind wir gegenwärtig mit der Situation konfrontiert, dass mit den wichigsten Kulturpflanzen, wie z. B. den Getreiden und Hülsenfrüchtlern, Gentransfer noch gar nicht, oder nur in sehr beschränktem Mass möglich ist. Die am weitesten verbreitete Methode basiert auf einem natürlichen Gentransfermechanismus eines Bodenbakteriums *(Agrobacterium tumefaciens)*. Dieses Bakterium hat einen biologischen Weg erfunden, Erbfaktoren in Pflanzenzellen einzuschleusen. Unter Ausnutzung dieses natürlichen Systems ist es nun möglich, jedes beliebige Gen durch das Bakterium in Pflanzen zu übertragen. Bedauerlicherweise funktioniet dies jedoch nicht bei allen Pflanzen und insbesondere nicht bei Getreiden. Aus diesem Grund hat man versucht, eine Methode zu erfinden, die von derartigen biologischen Unwägbarkeiten unabhängig ist. Dies gelang auf der Basis von isolierten, nackten Pflanzenzellen. Im folgenden Abschnitt wird diese Methode etwas ausführlicher beschrieben. Sie bietet insofern einen Fortschritt gegenüber der Bakterienmethode, als sie auch Gene in Getreidezellen übertragen kann. Sie ist aber für die praktische Anwendung nicht gut genug, weil das Problem nur von der Genübertragung auf die Pflanzenregeneration verlagert worden ist. Eine Reihe weiterer Ansätze wie z. B. «Mikroinjektion», «Makroinjektion», «Pol-

lentransformation», «Particle-Gun», «Elektroporation» u.a. haben z.T. vielversprechende Anfangserfolge erkennen lassen. Ob eine dieser Methoden jedoch einmal routinemässig einsetzbar sein wird, lässt sich gegenwärtig noch nicht abschätzen.

2.2 Isolierte Gene werden von nackten Pflanzenzellen aufgenommen

Am Beispiel dieser (in der Schweiz entwickelten) Methode des «direkten Gentransfers» soll erläutert werden, auf welche Weise ein neuer Erbfaktor in eine Pflanze eingebaut werden kann: Grundlage sind zellwandlose («nackte») Pflanzenzellen, die sogenannten «Protoplasten». Protoplasten können aus nahezu allen lebenden Pflanzengeweben isoliert werden, am einfachsten aus Blättern. Aus einzelnen Protoplasten lassen sich vollständige Pflanzen regenerieren. Um fremde Erbfaktoren in diese Protoplasten zu übertragen und stabil in das Erbgut einzubauen, genügt es, die Protoplasten gemeinsam mit den Erbfaktoren in einer wässrigen Lösung und in Gegenwart der einfachen chemischen Substanz Polyäthylenglycol zu baden. Polyäthylenglycol verändert das Erbgut der Pflanzenzelle weder direkt noch indirekt. Es ist an vielen Beispielen mit verschiedenen Pflanzen und Genen einwandfrei nachgewiesen worden, dass Pflanzen, die nach dieser Behandlung aufgezogen worden sind, das Fremdgen stabil in ihr Erbgut aufgenommen haben und dieses wie andere pflanzeneigene Erbfaktoren nach den Mendelschen Regeln der Vererbung an die Nachkommen weitergeben. Das aufgenommene Gen unterscheidet sich in seinem Verhalten in keiner Weise von «normalen» Pflanzengenen.

2.3 In der Phantasie lässt sich nun vieles machen, aber...

Da man offensichtlich Gene isolieren und in Pflanzen übertragen kann, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass man nun alles machen kann. Dies ist ein Trugschluss, dem leider nicht nur der Laie verfällt. Durch unsachliche Darstellung wissenschaftlicher Ergebnisse in den Medien hat sich in der Öffentlichkeit dieser falsche Eindruck festgesetzt. Bei Spekulationen darüber, auf welche Weise man die Gentechnologie einsetzen könnte, um Pflanzen zu verbessern, sind der Phantasie damit keine Grenzen gesetzt. In der Realität scheitern jedoch die schönsten Ideen sehr schnell an technischen Problemen. Einige Beispiele mögen dies illustrieren:

Nehmen wir an, man möchte (um beim oben erwähnten Beispiel zu bleiben) die Resistenz eines Wildgrases gegen Rostpilze in Weizen übertragen – ein sicherlich positiv zu bewertendes Vorhaben, da es die Möglichkeit eröffnen würde, den Einsatz von Fungiziden zu reduzieren. Dieses Vorhaben wäre gegenwärtig nicht zu realisieren, da man keine Möglichkeit hätte, das Gen (oder die Gene) für die Pilzresistenz zu isolieren, und weil man noch keine Methode gefunden hat, mit deren Hilfe man ein Gen in Weizen übertragen könnte. Bevor dieses interessante Experiment durchgeführt werden könnte,

müsste noch viel Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Identifizierung und Isolierung eines Gens dieses Typus betrieben werden. Und es müsste eine Methode erfunden worden sein, die effizienten Gentransfer in Weizen ermöglicht.

Oder stellen wir uns vor, man möchte eine Tomatensorte herstellen, die salzresistent ist und deshalb auf versalzten Böden wachsen kann. Dieses Projekt wäre schon etwas realistischer, weil die Genübertragung in Tomaten kein Problem mehr wäre. Im Hinblick auf die Identifizierung und Isolierung der Gene für Salzresistenz wäre man aber in der gleichen Situation wie oben. Man würde zusätzlich vermuten, dass mehrere Gene übertragen werden müssten – ein weiteres technisches Problem.

Wie wäre es, wenn man die ernährungsphysiologische Qualität der Speicherproteine in Rapssamen verbessern möchte, indem man einige unwichtige Aminosäuren durch wertvolle Aminosäuren ersetzt. Für dieses Experiment hätten wir bereits eine Menge wichtiger Grundlagen: Gentransfer in Raps ist eine Routinetechnik; die Erbfaktoren für einige Speicherproteine sind genetisch charakterisiert, und einige Gene sind isoliert und in ihrer detaillierten Struktur aufgeklärt. Man müsste also nur noch die Information für ein paar Aminosäuren herausnehmen und durch die Information für andere Aminosäuren ersetzen. Technisch wäre dies machbar. Man weiss jedoch noch nicht, in welchem Bereich des Proteins man diese Änderung vornehmen darf, ohne die Eigenschaften für deren spezifische Speicherung in Zellorganellen zu stören. Selbst in diesem Experiment, für welches eigentlich alle Grundlagen zur Verfügung stünden, ist noch weitere Grundlagenforschung notwendig, bevor es praxisreif ist.

Ein letztes Beispiel, bei dem alle technischen Probleme gelöst waren, und welches trotzdem zu keinem positiven Ergebnis geführt hat, ist insofern lehrreich, als es zeigt, dass die Biologie von sich aus dafür sorgt, «dass die Bäume nicht in den Himmel wachsen». Man hatte ein Gen aus einem arktischen Fisch isoliert, welches diesen Fisch dadurch frostresistent macht, dass ein Protein gebildet wird, welches Eiskristallbildung stört. Man wollte testen, ob man mit diesem Gen auch Pflanzen kälteresistent machen könnte. Pflanzenzellen, welche dieses Gen aufgenommen und integriert hatten, vermehrten sich und exprimierten das Gen, aber das Protein konnte in den Zellen nicht nachgewiesen werden. Offensichtlich wurde dieses Protein von den Pflanzenzellen nicht toleriert und sofort abgebaut.

Die angeführten Beispiele lassen leicht erkennen, dass man von der neuen Technologie keine Wunder erwarten sollte und dass man sich bei der Beurteilung der Gentechnologie aus dem Bereich der «Science-fiction» wieder in die Realität zurückbegeben sollte. Was ist nun die Realität der Gentechnologie mit Pflanzen?

3 Gentechnologie

3.1 Anwendung der Gentechnologie ist bisher auf wenige Beispiele beschränkt

Im Hinblick auf die praktische Anwendung der Gentechnologie in der Pflanzenzüchtung beschränken sich die Erfolge im wesentlichen auf drei Bereiche:

Virusresistenz: Pflanzenviren können den Ertrag von Kulturpflanzen stark reduzieren und bei vegetativ vermehrten Arten zum Verlust wertvoller Sorten führen. Aus der Erfahrung der Virusbekämpfung war das Phänomen der «cross-protection» bekannt – Infektion einer Pflanze mit einem «milden» Virusstamm kann eine Pflanze gegen einen aggressiven Virusstamm schützen. Es ist nun gelungen, das Virusgen, welches das Phänomen verursacht, zu isolieren, dieses Gen stabil in das Erbgut von Pflanzen einzubauen, und auf diese Weise Pflanzensorten zu gewinnen, welche durch Virusbefall nur noch geringfügig geschädigt werden. Dies wurde mittlerweile erfolgreich durchgeführt mit fünf verschiedenen Virusarten und vier verschiedenen Pflanzenarten. Es kann deshalb vermutet werden, dass dieses Prinzip des Virusschutzes relativ breit anwendbar sein könnte (für Pflanzen, in die man Gene übertragen kann, also z. Zt. nicht auf Getreide).

Raupenresistenz: Es gibt eine Reihe von Schmetterlingsarten, die auf Kulturflächen unerwünscht sind, weil ihre Raupen sich von den Kulturpflanzen ernähren. Bekämpft werden diese «Schädlinge» mit chemischen Insektiziden. Seit vielen Jahren hat man auch positive Erfahrung mit einem biologischen Insektizid gesammelt: Ein Bakterium *(Bazillus thuringensis)* produziert ein Protein, welches im Darm von Raupen modifiziert wird und dann für die Raupen toxisch ist. Insektenbekämpfung auf dieser Basis erfolgt durch Grossproduktion der Bakterien und deren Versprühen auf von Raupen befallene Kulturen. Die Idee lag nahe, zu versuchen, mit Hilfe der Gentechnologie das bakterielle Gen für dieses Protein stabil in Pflanzen einzubauen, um die Pflanzen selbst durch Eigenproduktion des Proteins resistent gegen Raupenfrass zu machen. Dies ist gelungen. Es gibt bereits mehrere Kulturpflanzen, welche auf diese Weise raupenresistent gemacht worden sind. Auch hier lässt sich vorhersagen, dass dies vermutlich bei allen Pflanzen durchführbar sein wird, in die Gene übertragen werden zu können.

Herbizidresistenz: Herbizide sind Substanzen zur Unkrautbekämpfung. Unterschiede in der Empfindlichkeit von Kulturpflanzen und «Unkräutern» werden ausgenutzt, um Kulturen unkrautfrei zu halten. Der Nachweis von Atrazin im Trinkwasser hat die Bevölkerung für die Problematik des Herbizideinsatzes sensibilisiert. Aus diesem Grund stösst auch die Idee, herbizidresistente Kulturpflanzen herzustellen, auf Ablehnung. Es wird befürchtet, dass dies dazu führt, dass die Umwelt durch noch mehr Herbizide belastet wird. Dies wäre unerwünscht und müsste verhindert werden. Deswegen aber eine Entwicklung in Richtung Herbiszidresistenz generell abzulehnen, wäre falsch,

da gute Aussichten bestehen, dass die Herbizidresistenz auf eine ökologisch positive Richtung zusteuert: Es existieren Herbizide, die in sehr geringen Mengen wirksam sind und schnell zu unbedenklichen Spaltprodukten abgebaut werden. Diese Herbizide konnten bisher nicht angewandt werden, weil sie auch die Kulturpflanzen töten. Wenn man die Kulturpflanzen resistent machen könnte gegen diese Gruppe von Herbiziden, könnten Unkräuter ökologisch sehr viel schonender bekämpft werden. Durch Identifizierung von Resistenzgenen gegen einzelne dieser neuen Herbizide in Bakterien und Pilzen, Isolierung dieser Gene und deren Einbau in verschiedene Kulturpflanzen hat man solche herbizidresistenten Pflanzen gewonnen.

Virusresistente, insektenresistente und herbizidresistente Pflanzen werden seit über einem Jahr in Feldversuchen auf ihre ökologische Unbedenklichkeit und auf ihre Wirtschaftlichkeit getestet. Diese Versuche erfolgen mit der Bewilligung staatlicher Aufsichtsgremien und unter Bedingungen, die mögliche ökologische Risiken praktisch ausschliessen.

3.2 Reale Gefahren mit transgenen Pflanzen sind bisher nicht zu erkennen

Ist Gentechnologie mit Pflanzen wirklich so gefährlich, wie es durch Gegner der Gentechnologie gern behauptet wird? Muss die Bevölkerung befürchten, dass ähnlich grosse Risiken auf sie zukommen, wie bei der Anwendung der Kernspaltung? Gibt es irgendeine Denkmöglichkeit, nach der eine gentechnologisch veränderte Pflanze eine unkontrollierbare Gefahr für den Menschen oder die Umwelt heraufbeschwören könnte? Wenn man sich die Mühe macht, eine Vielzahl möglicher Szenarien zu erfinden und zu durchdenken, kommt man zu dem Ergebnis, dass man die grösste Mühe hat, eine Gefahr zu konstruieren. Dem Autor ist dies noch nicht gelungen und offensichtlich haben auch andere Schwierigkeiten, eine konkrete Gefahr im obigen Sinne anzugeben. Ein Überdenken der möglichen Risiken, die mit konkreten Fällen verknüpft sein könnten, mag hilfreich sein bei der Beurteilung der Situation. Wir hatten gesehen, dass gentechnologisch gewonnene Pflanzen mit Virusresistenz, Raupenresistenz und Herbizidresistenz in Feldversuchen getestet werden. Die Feldversuche erfolgen mit der Bewilligung nationaler Aufsichtsgremien, welche nach reiflicher Erwägung aller denkbaren Risiken zur Überzeugung gelangten, dass die Feldversuche sinnvoll und ungefährlich sind. Die transgenen Pflanzen dürfen zunächst allerdings nur unter bestimmten Auflagen im Feld angebaut werden: a) Auf benachbarten Feldern dürfen gleichzeitig keine nahe vewandten Arten wachsen, um die Möglichkeit der Verbreitung des Fremdgens durch den Blütenstaub auszuschliessen. b) Es muss gewährleistet sein, dass durch Fremdbestäubung das Gen nicht in Unkräuter gelangen kann. c) Samen oder Früche müssen so geerntet werden, dass keine Nachkommen in die Umgebung des Versuchsfeldes gelangen können. d) Das Versuchsmaterial muss am Ende des Versuchs abgetötet werden. e) Bevor transgenes Pflanzenmaterial für die menschliche oder tierische Ernährung freigege-

ben werden kann, muss durch aufwendige, toxikologische Untersuchungen festgestellt worden sein, dass nichts Unvorhergesehenes in der Pflanze geschehen ist, was nachteilig für Mensch oder Tier wäre. Beweisen aber nicht gerade diese Vorschriften, dass die transgenen Pflanzen gefährlich sein können? Nein, sie zeigen jedoch, wie ernst die Bewilligungsgremien ihre Aufgabe nehmen, und wie sehr man bemüht ist, am Beginn der Entwicklung jedes nur denkbare Risiko zu vermeiden. Was könnte passieren, wenn jemand ohne Bewilligung oder unter Umgehung der Vorschriften transgene Pflanzen im Feld anbauen würde? Ein Risiko für den Menschen ergäbe sich dann, wenn toxisches Pflanzenmaterial ungeprüft verkauft werden könnte. Zum Verkauf sind nur geprüfte Sorten zugelassen. Wenn eine neue Sorte registriert werden soll, muss nachgewiesen werden, wie sie hergestellt worden ist. Besteht eine Gefahr, wenn jemand absichtlich etwas Böses tun möchte, wenn z.B. die kriminelle Absicht besteht, Menschen zu schaden, indem man ein Giftgen in eine Nahrungspflanze einbaut, um vergiftete Nahrung zu verkaufen? Abgesehen davon, dass neue Sorten zum Verkauf zugelassen werden müssen und dies die oben beschriebenen Prüfungen voraussetzt: wenn jemand so etwas tun möchte, gibt es wesentlich einfachere Methoden als die Gentechnologie. Wie könnte die Umwelt gefährdet werden, wenn transgene Pflanzen unbewilligt und ohne die gegenwärtig geforderten Vorsichtsmassnahmen freigesetzt werden? Anhand des Merkmals «Herbizidresistenz», das in diesem Zusammenhang vielen Mitbürgern die unsympathischste Denkmöglichkeit darstellt, soll versucht werden, ein Szenario durchzudenken. Vier «Gefahren» werden immer wieder angeführt: a) Die herbizidresistente Kulturpflanze dringt in natürliche Biotope ein und verdrängt dort Wildpflanzen. b) Durch Fremdbestäubung gelangt Pollen (und damit das Gen) in eine Wildpflanze und macht diese herbizidresistent. c) Auf dem Feld, auf dem die herbizidresistente Kulturpflanze angebaut wird, entstehen wegen der Herbizidbehandlung spontan herbizidresistente Unkräuter. d) Es kommt zu einem übermässigen Herbizideinsatz und damit zu einer Verseuchung des Grundwasers. Selbst wenn jemand böswillig ein natürliches Biotop zerstören wollte und dafür eine herbizidresistente Kulturpflanze in dem Biotop anbauen würde, würde dies nicht zu einer Ausbreitung der Kulturpflanze, sondern zu deren Verschwinden führen. Die herbizidresistente Kulturpflanze hätte in einem natürlichen Biotop nur dann einen Selektionsvorteil, wenn man das Biotop mit dem Herbizid behandeln würde, gegen das die Kulturpflanze resistent ist. Wenn man ein natürliches Biotop mit diesem Herbizid zerstören will, braucht man nicht zusätzlich die Kulturpflanze einzubringen (a). Wenn eine Wildpflanze durch Bestäubung mit einer Kulturpflanze Nachkommen bekommt, die zur Hälfte das Kulturpflanzenerbgut enthalten, werden diese Nachkommen aller Wahrscheinlichkeit nach den vollwertigen Wildpflanzen gegenüber im Biotop unterlegen sein und schnell verdrängt werden. Falls dies nicht der Fall sein sollte, haben diese herbizidresistenten «Wild/Kulturpflanzen» im natürlichen Biotop nur einen Selektionsvorteil, wenn das Biotop mit dem spezifischen

Herbizid behandelt wird. Die Wildpflanze hätte also sogar einen ökologischen Vorteil gewonnen, falls jemand auf die Idee käme, das Biotop mit dem Herbizid zu vergiften (b). Der Einsatz von Herbiziden kann zur Ausbildung herbizidresistenter Unkräuter führen. In dieser Beziehung machen wohl auch die neuen Totalherbizide prinzipiell keine Ausnahme. Da es nur sinnvoll ist, diese Herbizide einzusetzen, wenn man über resistente Kulturpflanzen verfügt, und da man diese Pflanzen vorerst nur gentechnologisch entwickeln kann, besteht ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Gentechnologie und voraussagbarer Entstehung neuer herbizidresistenter Unkräuter. Ist dies jedoch eine «unkontrollierbare» Gefahr für die Umwelt? Weder die Kulturpflanzen noch die durch Herbizidbehandlung selektionierten möglichen resistenten Unkräuter sind allgemein herbizidresistent. Sie sind resistent gegen ein ganz spezifisches Herbizid und können deshalb mit anderen Herbiziden bekämpft werden. Und selbst wenn überhaupt kein Herbizid mehr helfen würde, könnte man das Unkraut durch Jäten entfernen. Das Schlimmste, was auftreten könnte, wäre also ein beschränkter, ökonomischer Schaden, aber keine unkontrollierbare, ökologische Gefahr (c). Muss erwartet werden, dass wegen der Entwicklung herbizidresistenter Kulturpflanzen mehr (und natürlich unbedenklich) Herbizide eingesetzt werden? Selbst dies ist kaum zu befürchten, und es wäre ausserdem kontrollierbar. Ganz im Gegensatz zur Befürchtung ist zu erwarten, dass sich die Herbizidsituation entschärfen wird: Die neue Möglichkeit, Kulturpflanzen gentechnologisch resistent zu machen gegen spezifische Herbizide, eröffnet die Gelegenheit, eine neue Klasse von Herbiziden weiterzuentwickeln und einzusetzen, welche bisher, wegen der fehlenden Resistenz in Kulturpflanzen, nicht verwendet werden konnten. Diese Herbizide bringen für die Anwendung ökologische Vorteile und nicht Nachteile. Sie sind in wes[illegible]h geringeren Mengen aktiv, werden viel schneller in der Natur ab[illegible]u Abbauprodukten, welche biologisch völlig harmlos sind, und sie [illegible]hr viel gezielter und damit schonender eingesetzt werden. Selbstv[illegible] muss vor einer Freigabe dieser neuen Herbizide untersucht werd[illegible] Einfluss sie auf die Mikrofauna und Mikroflora des Bodens h[illegible]n.

Die oben diskutiert[illegible] repräsentieren selbstverständlich nur einen kleinen Ausschnitt de[illegible]entechnologisch machbar wäre. Ausserdem wurden di[illegible]nzen nur andiskutiert und nicht bis zu Ende [illegible]n vorgegebenen Rahmen nicht möglich. Der [illegible]genen drei Jahren in vielen Diskussionen mit [illegible]um und in ausführlichen Fachdiskussionen mit [illegible]ne einziges «gefährliches» Szenario entwickeln [illegible] gerechtfertigt, anzunehmen, dass von transge[illegible]llierbare und einer Atombombe oder einem [illegible]efahr ausgeht. Da zusätzlich gentechnologische [illegible]enkbarem Risiko, unter mehr oder weniger auf[illegible]ungen durchgeführt wird, und der Anbau von

veränderten Pflanzen die Bewilligung einer unabhängigen Bundesbehörde benötigt, scheint es auch berechtigt, festzustellen, dass es keinen sachlichen Grund für eine Beunruhigung wegen möglicher unkontrollierbarer Gefahren gibt. Es wäre dankenswert, wenn diejenigen, welche mit dem Argument der Gefahr gegen die Gentechnologie mit Pflanzen argumentieren, ein oder einige konkrete Beispiele anführen könnten.

4 Literatur

Handbücher

D. A. Evans, et. al., Handbook of Plant Cell Culture, Volume 1–4, Macmillan Publishing Company, New York 1983.

K. J. Puite, et. al., Progress in Plant Protoplast Research, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1988.

J.-P. Zryd, Cultures de Cellules, Tissus et Organes Végétaux, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne 1988.

Peter R. Day, Biotechnology and Crop Improvement and Protection, The British Crop Protection Council, Thornton Heath 1986.

W. Horn, et. al., Genetic Manipulation in Plant Breeding, Walter de Gruyter, Berlin 1986.

Th. Hohn and J. Schell, Plant DNA Infectious Agents, Springer Verlag, Wien 1987.

Originalpublikationen

J. Paszkowski, et. al., Direct gene transfer to plants, EMBO, J., *3:* 2717 (1984).

I. Potrykus, et. al., Molecular and general genetics of a hybrid foreign gene introduced into tobacco by direct gene transfer, Mol Gen Genet, *199:* 169 (1985).

I. Potrykus, et. al., Direct gene transfer: State of the art and future potential, Plant Molecular Biology Reporter, *3:* 117 (1985).

W. De Greef, et. al., Evaluation of herbicide resistance in transgenic crops under field conditions, Bio/Technology, *7:* 61 (1989).

R. S. Nelson, et. al., Virus tolerance, plant growth and field performance of transgenic tomato plants expressing coat protein from tobacco Mosaic Virus, Bio/Technology, *6:* 403 (1988).

D. A. Fischhoff, et. al., Insect tolerant transgenic tomato plants, Bio/Technology, *5:* 807 (1987).

D. E. McCabe, et. al. Stable transformation of soybean (Glycine Max) by particle acceleration, Bio/Technology, *6:* 923 (1988).

K. Shimamoto, et. al., Fertile transgenic rice plants regenerated from transformed protoplast, Nature, *338:* 274 (1989).

C.A. Rhodes, et. al., Plant regeneration from protoplasts isolated from embryogenic maize cell cultures, Bio/Technology, *6:* 56 (1988).

J. Davison, Plant beneficial bacteria, Bio/Technology, *6:* 282 (1988).

S.D. Tanksley, et. al., RFLP mapping in plant breeding: New tools for an old science, Bio/Technology, *7:* 257 (1989).

Prof. Dr. I. Potrykus, Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/3: 175–196

Einsatzmöglichkeiten der Kernspintomographie in der Holzforschung

Ladislav J. Kučera, ETH Zürich

Die Kernspintomographie ist eine zerstörungsfreie Methode, mit welcher zweidimensionale Bilder der Wasserverteilung in einem Holzkörper gewonnen werden können. In der vorliegenden Arbeit werden die Einsatzmöglichkeiten der Kernspintomographie in holzkundlichen und holztechnologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Wasserverteilung im Holz aufgezeigt. Einleitend wird auf die Rolle des Wassers in der Baumphysiologie, der Holzkunde und der Holztechnologie hingewiesen. Die bisherigen Methoden der Wassergehaltsbestimmung werden kritisch besprochen. Die Grundlagen der kernspintomographischen Darstellung des Wassers werden kurz erörtert und die Aussagekraft anhand zahlreicher Beispiele veranschaulicht. Im Sinne einer Synthese werden die möglichen Aufgabenstellungen für die Kernspintomographie in der Holzforschung aufgezeigt.

Potential Applications of the Nuclear Magnetic Resonance Tomography in Wood Research

The nuclear magnetic resonance tomography is a non-destructive method, which renders two-dimensional figures of water distribution in wood. The potential applications of this method in forest and wood research are summarized. In the introductory chapter, the role of the water in tree physiology, wood science and wood technology is outlined. A critical review of the established methods of the determination of the water content in wood is presented. The fundamentals of the nuclear magnetic resonance tomography are briefly outlined. The advantages of this new method are visualized by numerous examples. In conclusion, a list of the potential uses of the nuclear magnetic resonance tomography in the research fields of tree physiology, wood science and wood technology is presented.

1 Einleitung

Betrachtet man das Holz als pflanzliches Gewebe, als Industrierohstoff oder als Energieträger: Es fällt einem stets die eminente Bedeutung des Wassergehaltes auf. Kaum ein anderes Material hat eine so komplexe Beziehung zum Wasser wie das Holz. Entsprechend zahlreich sind die Methoden zur Ermittlung von Wassergehalt, Verteilung des Wassers, Transportgeschwindigkeiten, usw. Mit der Kernspintomographie wurde auf diesem Gebiet eine Methode eingeführt (L.J. Kučera und P. Brunner 1985), welche in biologischer wie technischer Erforschung des Holzes neue Erkenntnisse zu vermitteln verspricht.

2 Die Rolle des Wassers in der Baumphysiologie

Das Holz durchläuft die drei Phasen des biologischen Stoffkreislaufes der Natur: die Bildung, die Alterung und die Auflösung (L.J. Kučera 1984).

2.1 Holzbildung

Das Holz ist das mittelbare Produkt der photosynthetischen Aktivität, welche sich in den Chloroplasten des Blattgewebes vollzieht. Die Photosynthese ist ein endothermer Prozess, welcher nach folgender Formel verläuft: 6 CO_2 + 12 H_2O + 2906 kJ = $C_6H_{12}O_6$ + 6 O_2 + 6 H_2O. Diese Gleichung präsentiert sich nach dem Einsetzen der Molgewichte wie folgt: 264,0 g CO_2 + 216,2 g H_2O + 2906 kJ = 180,2 g $C_6H_{12}O_6$ + 192 g O_2 + 108,1 g H_2O, oder in Gewichtsprozenten: 55% CO_2 + 45% H_2O + 2906 kJ = 38% $C_6H_{12}O_6$ + 40% O_2 + 22% H_2O.

Das Holz wird folglich zu rund 23% aus dem durch die Wurzeln aufgenommenen Wasser aufgebaut. Da das CO_2-Angebot relativ konstant ist, widerspiegelt die kambiale Aktivität in der Form unterschiedlich breiter Jahrringe vorab die Schwankungen in der Wasserversorgung im Verlauf der Vegetationsperiode, während niedrige Temperaturen und/oder ungenügende Mineralsalzernährung hauptsächlich an extremen Standorten das Wachstum begrenzen (H. Lyr et al. 1967). Die Zellteilungen im Kambium bestimmen die Quantität des gebildeten Holzes. Seine Qualität – d.h. Zusammensetzung nach Zellarten, Zelldimensionen – wird durch die anschliessende Zelldeterminierung und -differenzierung festgesetzt. Dabei können sich Umwelteinflüsse auf eine vorderhand ungeklärte Art bemerkbar machen, indem z.B. Bäume unter Wasserstress vermehrt Wasserleitgewebe ausbilden (E. Chevallier 1980).

2.2 Holzalterung

Die Alterung der Holzzellen setzt unmittelbar nach ihrer Differenzierung aus dem Kambium ein. Das Nadelholz besteht mehrheitlich aus kurzlebigen, meist dickwandigen, faserförmigen Zellen (ca. 90–95% z.B. Föhre), welche die Funktionen der mechanischen Festigung des Stammes und der Leitung des aufsteigenden Transpirationswassers ausüben. Im Laubholz werden die Funktionen der Wasserleitung und Festigung von verschiedenen Zelltypen wahrgenommen; entsprechend ist der Anteil des spezialisierten Wasserleitgewebes geringer als im Nadelholz (ca. 65–85%, Eiche 66%, Rosskastanie 84%; nach [B. Huber und G. Prütz 1938]). Eine Minderheit der Holzzellen ist backsteinförmig, dünnwandig und langlebig; diese Zellen dienen dem Transport, der Speicherung und der Umwandlung von organischen Verbindungen. Abgeschlossen wird der Alterungsprozess durch die Aufhebung der Zellfunktionen in der Wasserleitung und der Speicherung. Auslösend für diese Funktionsenthebung sind eine unzureichende Wasserversorgung und/oder Hoftüpfel-Verkrustung und dadurch eine langsame Austrocknung der Gewebe. In der Folge werden die toten wasserleitenden Zellen entweder nach einem physikalischen Prinzip durch den entstandenen Druckgradienten (Verschluss von Tracheiden-Hoftüpfeln im Nadelholz) oder auf physiologisch-biochemischer Grundlage durch die Aktivität benachbarter Speicherzellen (Thyllenbildung im Laubholz) verschlossen. Die Speicherzellen sterben ab, wobei die Reservesubstanzen veratmet und teilweise zu Kernstoffen mit phenolischem Charakter

umgewandelt werden. Durch diesen Vorgang wird der Holzkörper im Normalfall in einen physiologisch aktiven äusseren Splintholzbereich mit Wassergehaltswerten von ca. 70% bis zu 250% des Holz-Trockengewichtes und einen inaktiven inneren Kernholzbereich mit einem Wassergehalt von rund 30–60% differenziert. Die Versorgung der Baumkrone mit Wasser ist in Zeiten hinreichenden Wasserangebotes und bei intakten Wurzeln und Krone durch den Splintholzanteil bestimmt. Abweichungen von diesem Prinzip durch erhöhte Fliessgeschwindigkeiten des Wassers sind durch physikalische Gesetzmässigkeiten Grenzen gesetzt.

Daraus ergibt sich, dass der Splintholzanteil als Mass der Baumvitalität betrachtet werden kann, denn er bestimmt die transpirationsphysiologische Effizienz des Baumes unter den gegebenen äusseren Bedingungen. Untersuchungen an umweltgeschädigten Nadelbäumen haben diese Erkenntnis wiederholt bestätigt (L.J. Kučera 1984; J. Bauch et al. 1978; A. Frühwald und J. Bauch 1984; F. Hapla 1986; P. Rademacher 1986; G.R. Schnell et al. 1987). In Tat und Wahrheit sind nach heutigem Stand der Kenntnisse der verminderte Splintholzanteil und ein reduzierter Wassergehalt des Splintholzes die einzigen gesicherten holzkundlichen Unterschiede zwischen den gesunden und den immissionsgeschädigten Bäumen. Die Verwendung dieser Merkmale als Indikatoren der Baumvitalität erfordert jedoch umfangreiche Voruntersuchungen, in denen der Einfluss der Baumart, des Baumalters, der soziologischen Stellung des Baumes und der vertikalen Lage der untersuchten Position abgeklärt werden sollten. Ferner muss in allen Untersuchungen und Vergleichen auf die Standortsfaktoren (Boden, Klima) Rücksicht genommen werden.

2.3 Holzauflösung

Das Holz ist sehr dauerhaft, vorausgesetzt, dass es beständig in trockenem oder wassergesättigtem Zustand gehalten wird. Es kann durch das Feuer wie auch durch mechanische Kräfte (Naturgewalten, Insekten, höhere Tiere) und chemische Einwirkungen (UV-Strahlung, Mikroorganismen, Pilze) zerstört werden. Lässt man das Feuer ausser acht, dann sind die Pilze und die Insekten die wichtigsten Holzzerstörer. Diese Organismen können das Holz nur dann befallen, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Die wichtigste davon ist der Wassergehalt des Holzes. So ist beispielsweise das Optimum für den Befall durch die meisten Pilzarten bei Holzfeuchtigkeiten von 35–50%, und bei Feuchtigkeiten unterhalb von 20% resp. oberhalb von 80% ist das Holz vor einem Neubefall durch Pilze (mit Ausnahme des Hausschwammes) so gut wie sicher. Ähnliches, wenn auch weniger eindeutig, gilt für einen Insektenbefall. Die natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes – seine Widerstandsfähigkeit gegen einen Pilz- oder Insektenbefall – ist im Splint- und im Kernholz oft verschieden. Das Splintholz geniesst eine Schutzwirkung durch den hohen Wassergehalt. Beim Kernholz sind die obligatorischen und fakultativen Kernholzarten zu unterscheiden. Bei den ersteren wird dem Kernholz

durch die Einlagerung niedermolekularer Kernstoffe in die Zellwände ein gewisser Schutz vor biologischer Zersetzung gewährt (z.B. Lärche, Föhre, Eiche). Im zweiten Falle sind die Kernstoffe hochmolekularer Natur und in den Zellumina eingelagert, so dass eine Schutzwirkung ausbleibt (z.B. Buche, Esche). Während die parasitierenden Pilze und Insekten (Zerstörer stehender Bäume) recht genaue Anforderungen hinsichtlich Substrat (Holzart, Splint- oder Kernholz) und seiner Feuchtigkeit stellen, sind die Saprophyten (Schädlinge an lagerndem oder verbautem Holz) diesbezüglich flexibler und daher auch gefährlicher.

3 Die holzkundliche und holztechnologische Bedeutung des Wassers

Das Holz ist ein Festkörper, dessen physikalisch-mechanischen Eigenschaften durch seine chemische Zusammensetzung, seinen anatomischen Aufbau und seinen Zustand bestimmt werden. Während Zusammensetzung und Aufbau im bereits gebildeten Holz relativ konstant sind, verändert sich der Zustand des Holzes mit variierenden Umweltbedingungen. Sowohl Temperatur als auch (und vor allem) Wassergehalt haben einen entscheidenden Einfluss auf die physikalisch-mechanischen Holzeigenschaften, wobei sich das Holz generell thermo- und hydroplastisch verhält.

Das Holz ist ein Kapillarkörper mit einer immensen inneren Oberfläche, welche beispielsweise in einem Kubikzentimeter Fichtenholz ca. 100 m^2 beträgt. Diese innere Oberfläche ist dicht mit freien Hydroxylgruppen besetzt, welche hydro- und hygroskop sind und somit Wasser in flüssiger oder Dampfform binden. Diese Art der Wasseraufnahme spielt sich zwischen absolut trockenem Zustand und der Fasersättigung (rund 30% Wassergehalt bezogen auf das Trockengewicht des Holzes) vor allem in den Zellwänden ab. Oberhalb der Fasersättigung kann bis zu einem Maximum von etwa 200% bis 250% (einheimische Holzarten) Wasser frei tropfbar in den makro- und mikroskopischen Hohlräumen (insbesondere Zellumina) eingelagert werden. Im ersten Fall spricht man von gebundenem, im zweiten von freiem Wasser im Holz.

3.1 Holzkunde

Wohl die elementarste *physikalische Kenngrösse* des Holzes ist seine Raumdichte, d.h. das Gewicht des Holzkörpers je Volumeneinheit. Holz verändert sein Gewicht je nach aktuellem Wassergehalt. Es verändert zudem auch seine Dimensionen, denn die Aufnahme des gebundenen Wassers ist mit einer Quellung des Holzes verbunden. Daher ist die Raumdichte des Holzes keine Konstante, sondern eine Zustandsgrösse, die in doppelter Hinsicht vom Wassergehalt abhängig ist. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem die Raumdichte des Holzes stets bei einem bestimmten Wassergehalt (meistens

)%, 12% oder 15%) angegeben wird. Die Quellung wie auch die entgegengeetzte Schwindung des Holzes sind anisotrop (richtungsverschieden) in ungeähren Verhältnis von längs:radial:tangential = 1:10:20.

Die *mechanischen Festigkeiten* des Holzes werden von seinem Wassergehalt nitbestimmt. Mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt zwischen 0% und 30% nehnen die mechanischen Kennwerte des Holzes (Zug-, Druck- und Biegefestigceit, Härte, Biege-Elastizitätsmodul) teilweise erheblich ab. Oberhalb der Faersättigung hat der Wassergehalt nur noch einen minimen Einfluss auf die Festigkeitswerte. Eine Ausnahme von der obigen Regel bildet die (dynamische) Bruchschlagarbeit des Holzes, die vom Feuchtigkeitsgehalt unabhängig oder gar mit diesem schwach positiv korreliert ist. Da vom Wassergehalt abıängig, werden die Festigkeitswerte ebenfalls bei einem bestimmten Wassergehalt (12%) ermittelt und aufgeführt.

Das Holz ist ein *Isolator,* bedingt durch seine poröse Struktur setzt es seiıer Durchdringung durch Schall, Wärme, Elektrizität und andere Wellenbewegungen einen erheblichen Widerstand entgegen. Die Isoliereigenschaften sind mit dem Wassergehalt negativ korreliert; die Wärmeleitzahl erhöht sich beispielsweise zwischen 0% und 30% Feuchtigkeitsgehalt mit dem Faktor 2, die elektrische Leitfähigkeit gar mit dem Faktor 10^6.

Schliesslich ist das Holz nicht nur ein Bau- und Werkstoff, sondern auch ein *Energieträger.* Sein Brennwert (die Reaktionsenergie, welche bei der Verbrennung freigesetzt wird) ist mit dem Wassergehalt negativ korreliert. Es lässt sich rechnerisch zeigen, dass der Brennwert des Holzes bei einem Wassergehalt von 733% gleich Null wäre. In anderen Worten: Es lassen sich mit einem Gramm absolut trockenen Holzes genau 7,33 Gramm Wasser von flüssiger Form (bei 25 °C) in die Dampfform (bei 101 °C) überführen. Diese enge Beziehung ist um so bedeutsamer, als die Holzart nur einen bescheidenen Einfluss auf den Brenn- und Heizwert des Holzes (17,5–19,5 MJ/kg in absolut trockenem Zustand) hat. Der Brennwert des Holzes wird in der Regel in lufttrockenem Zustand (Wassergehalt ca. 16–18%) angegeben.

3.2 Holztechnologie

Bei der Bearbeitung und Verwendung des Holzes werden die holzkundlichen Gesetzmässigkeiten in einer komplexen Art und Weise wirksam. Aus dem Zusammenspiel von mehreren grundlegenden Eigenschaften und Zustandsgrössen ergeben sich oft schwer quantifizierbare verwendungsbezogene Merkmale, welche man als technologische Eigenschaften zu bezeichnen pflegt. So ist beispielsweise die *Spaltbarkeit* vom anatomischen Aufbau, dem Wassergehalt des Holzes und der Spaltrichtung (radial, tangential) abhängig. Die *Dauerhaftigkeit* wie auch die *Imprägnierbarkeit* werden besonders durch die Holzart, den Querschnittsbereich (Splint- resp. Kernholz) und den Wassergehalt des Holzes beeinflusst. Der *Energieaufwand* bei der mechanischen Verarbeitung des Holzes (Sägen, Schälen, Messern, Zerhacken, Schleifen) ist mit sei-

nem Wassergehalt negativ korreliert: Nasses Holz erfordert eine geringere Verarbeitungsenergie als trockenes Holz. Massgeblich ist der Wassergehalt sodann für die *Holztrocknung*. Das Trocknungsgefälle (die Geschwindigkeit bei der technischen Trocknung) richtet sich nach der Holzart, der Dimension des Trockengutes und seinem augenblicklichen Wassergehalt. Es ist einleuchtend, dass Holzwaren mit höherer Anfangsfeuchte erhöhte Energiemengen bei der Trocknung erfordern. Aber auch das Verhalten des Holzes während der Trocknung (Änderungen von Form und Farbe) wird durch seinen Wassergehalt geprägt. Die Holztrocknung ist besonders bei Bau- und Möbelteilen unerlässlich, welche im fertigen Zustand keine Dimensionsänderungen mehr aufweisen dürfen. Daher muss das Holz vorgängig auf die Gleichgewichtsfeuchtigkeit der späteren Umgebung (z.B. beheizter Wohnraum) vorgetrocknet werden. Daneben ist die Holztrocknung aus weiter oben erwähnten Gründen auch eine Schutzmassnahme gegen Pilz- und Insektenbefall. Auch bei der *Oberflächenbehandlung* des Holzes muss sein Feuchtigkeitsgehalt bekannt sein, denn viele Farben und Lacke haben einen hydrophoben Charakter und lassen sich bei nassem Holz nicht einwandfrei applizieren. Es gibt schliesslich Verfahren, bei denen der Wassergehalt des Holzes definitiv diskriminierend wirkt. So ist beispielsweise der *mechanische Holzaufschluss* an einen Mindestgehalt an Wasser im Holz gebunden. Wird dieser Wert im Verlauf der natürlichen Trocknung lagernden Holzes unterschritten, dann kann das Holz nicht mehr mechanisch aufgeschlossen werden, dies weniger wegen des erhöhten Energieverbrauches, sondern vielmehr mit Hinblick auf die schlechte (kurzfaserige) Zellstoffqualität gewonnen aus trockenem Holz.

4 Bisherige Methoden der Wassergehaltsbestimmung

In der Fachliteratur werden nicht weniger als 15 Methoden zur Bestimmung des Wassergehaltes von Holz beschrieben (F. Kollmann und G. Höckele 1962), von denen jedoch nur 3–4 eine praktische Bedeutung erlangt haben (V.-R. Huy 1985). Grundsätzlich lassen sich diese Methoden in direkte und indirekte einteilen.

Bei den *direkten Methoden* wird die im Holz vorhandene Wassermenge bestimmt. Hierher gehört die älteste Methode, bei der der Wassergehalt aus dem Gewichtsunterschied der Probe im ursprünglichen Zustand und nach einer Trocknung bis zur Gewichtskonstanz errechnet wird. Diese *gravimetrische Methode* ist recht einfach, jedoch auch arbeitsintensiv. Das Vorliegen mehrerer Normen (DIN 52183, ASTM D2016–65) ist eine Stärke dieser Methode. Im Jahre 1961 wurde ein chemisches Verfahren zur Wassergehaltsbestimmung – die *Iodometrische Titration nach Karl Fischer* – in der Holzforschung eingeführt (H.H. Bosshard 1961). Dieses Verfahren ist sehr genau, setzt jedoch einige Ansprüche an die Einrichtungen und Ausführung. Beide direkten Methoden sind arbeitsintensiv, destruktiv, und sie liefern je Messvorgang nur einen

Wert, nämlich den totalen Wassergehalt der Probe. Die Verteilung des Wassers im Probenkörper kann dabei nur über Mess-Serien eruiert werden.

Die *indirekten Methoden* basieren auf der Erkenntnis, dass die Holzeigenschaften wie Elastizität und Leitfähigkeiten vom Wassergehalt des Holzes abhängig sind. Gemessen wird hier denn auch nicht das Wasser, sondern eine Eigenschaft des (nassen) Holzes. Einige dieser Methoden sind nichtdestruktiv, so dass wiederholte Messungen möglich sind. Da sie aber indirekt sind, erfordern sie eine vorgängige Eichung und eine sorgfältige Interpretation der Ergebnisse. So kann beispielsweise das Astknotenholz in der Röntgentomographie mit einer Wasseransammlung verwechselt werden. Ein weiterer Nachteil dieser Verfahren liegt in ihrer Abhängigkeit von der anatomischen Richtung, bedingt dadurch, dass die gemessenen Kennwerte auch richtungsabhängig (längs, radial, tangential) sind. Dadurch wird der Aufwand für die Eichung mindestens verdoppelt oder gar verdreifacht. Ferner sind mehrere dieser Methoden nur in bestimmten Feuchtigkeitsbereichen anwendbar. Die wichtigste dieser Methoden ist die *elektrische Widerstandsmessung,* wobei wahlweise der Ohmsche resp. der kapazitative Widerstand gemessen werden. Die elektrische Messmethode liefert im Bereich von 7% bis 22% Wassergehalt gute Ergebnisse. Auch für diese Methode liegt eine Norm vor (ASTM D2016–65). In den letzten Jahren wurde diese Methode von einer Punktmessung zu einer kontinuierlichen Messung erweitert, dies semiquantitativ auch im Bereich oberhalb der Fasersättigung (H.R. Skutt et al. 1972; L.J. Kučera 1985). Oft sind in der Forschung Messreihen erforderlich, welche zeitlich und räumlich differenziert sind. Eine kürzlich vorgestellte Anlage (J. Welling 1986) vermag zeitlich gestaffelte Messwerte von sechs Messstellen zu erheben. Immerhin ist der elektrische Widerstand des Holzes von zahlreichen Einflussgrössen wie Temperatur, Holzdichte usw. abhängig (H.F. Vermaas 1984). Die Messung der *Wärmeleitfähigkeit* kann sowohl zur Bestimmung des Wassergehaltes als auch zur Ermittlung der Wassertransport-Geschwindigkeiten eingesetzt werden (J.P. Hösli et al. 1987), doch auch dieses Verfahren ist mit methodischen Schwierigkeiten und einem erheblichen apparativen Aufwand verbunden. Der *Schallwiderstand* des Holzes ist eher geeignet, grobe Störungen der Holzstruktur (z.B. durch Pilzbefall) aufzudecken (B.D. Miller et al. 1965) als den Wassergehalt zu ermitteln. Die Verwendung von *Röntgen- und Gamma-Strahlung,* bereits vor Jahrzehnten vorgeschlagen (W.E. Eslyn 1959), hat in der letzten Zeit grosse Fortschritte verzeichnet (E. Lausch und Th. Mayer 1985). Die Röntgen-Computertomographie ist eine nichtdestruktive Methode, welche ein oder mehrere Schnittbilder der untersuchten Objekte liefert. Die Dichteverteilungen in den Schnittbildern können in Form von Höhenschichtlinien, in isometrischer Form oder als Farbtomogramm dargestellt werden. Bei voller Anerkennung der Vorzüge dieser Methode muss daran erinnert werden, dass hier die Dichte des Objektes und nicht etwa sein Wassergehalt dargestellt wird.

5 Die Grundlagen der Kernspintomographie

Die Methode «Kernresonanz» benützt die Eigenschaft des Eigendrehimpulses der Atomkerne, den Spin. Sehr viele Atomkerne des periodischen Systems der Elemente besitzen einen Spin. Die für die Biologie wichtigsten Kerne mit einem Spin sind sicher Wasserstoff, Kohlenstoff, Phosphor und Stickstoff. Um den Effekt der Kernresonanz zu verstehen, kann man sich den Kern als Kreisel vorstellen, der um seine Achse rotiert. Legt man diesen Kreisel in ein Magnetfeld, richtet sich die Achse des Kreisels parallel zur Richtung des Magnetfeldes. Den Kernresonanzeffekt kann man beobachten, nachdem man für kurze Zeit ein zweites Feld senkrecht zum Magnetfeld anlegt. Dieses Feld wird durch einen Hochfrequenzimpuls erzeugt, der auf eine Sende/Empfangsspule geschickt wird. Der Puls wird üblicherweise so bemessen, dass die Auslenkung des Spins aus seiner Ruhelage 90° beträgt.

Unmittelbar nach dem Anregungsimpuls beginnt der Spin, sich in seine Ruhelage zurückzubewegen. Gleichzeitig beginnen sich die Spins, je nach ihrer direkten Umgebung, in der Ebene senkrecht zur Magnetfeldachse auszubreiten. Diese Bewegung kann als Oszillation beobachtet werden und ist das eigentliche Kernresonanzsignal. Es wird nach Abschalten des Sendeimpulses empfangen, aufgezeichnet und einer Fourieranalyse unterworfen, aus der schliesslich das Kernresonanzspektrum hervorgeht.

Dies ist die gemeinsame Grundlage der *Kernresonanz-Spektroskopie* und der *Kernresonanz-Tomographie* (P. Brunner 1987).

5.1 Übersicht der bisherigen Entwicklung

Die Kernresonanz-Spektroskopie macht sich die Erkenntnis zunutze, dass die Präzessionsfrequenz der Kreiselbewegung des spinmagnetischen Momentes in einem äusseren Magnetfeld von der unmittelbaren molekularen Umgebung abhängig ist und sich phänomenologisch auf molekulare Strukturelemente wie funktionelle Gruppen zurückführen lässt (G. Bodenhausen 1985). Die NMR-Spektroskopie ist seit Jahrzehnten in der Strukturforschung (auch in der Holzforschung) eingeführt. Sie wird besonders zur Bestimmung der molekularen Strukturformel unbekannter Substanzen, zur Untersuchung über die molekulare Konformation (in vitro Spektroskopie) und über den Ablauf langsamer dynamischer Vorgänge, molekularer Umlagerungen und Austauschprozesse (in vivo Spektroskopie) eingesetzt. In der Holzforschung wurde die NMR-Spektroskopie besonders in der Erforschung der Ligninstruktur angewendet. Die NMR-Spektroskopie erlaubt auch eine zerstörungsfreie und im Feuchtigkeitsbereich von 0% bis 176% genaue Bestimmung des Wassergehaltes von Holz (A.R. Sharp et al. 1978) sogar bei Temperaturen von –30°C bis +100°C (A.J. Nanassy 1978). Allerdings resultiert eine solche Messung in einer einfachen Zahlenangabe, wie sie auch mit den im Kapitel 4 erwähnten Methoden ermittelt werden kann.

Um das Bild der Wasserverteilung zu gewinnen, bedarf es der Kernreso-ıanz-Tomographie. Hier wird anstelle der Gesamtresonanz deren räumliche /erteilung untersucht. Eine erste Darstellung der räumlichen Verteilung von Vasserstoff-Atomen in einem Objekt gelang 1973 (P. Lauterbur 1973); we-entliche Beiträge zur Entwicklung der Kernspintomographie wurden an der :TH-Zürich geleistet (Anil Kumar et al. 1975). Um eine raumabhängige Ver-eilung der Kernresonanz-Signale zu erhalten, bedarf es zusätzlich zur be-chriebenen Versuchsanordnung eines schwachen und sich linear verändern-len Magnetfeldes (Magnetfeldgradienten). Dadurch «spürt» nun jeder Spin, ntsprechend dem Ort, wo er sich befindet, eine andere Magnetfeldstärke. So ntsteht auch nach der Fourieranalyse nicht mehr die eigentliche Resonanzli-ie des Protonensignals, sondern die Projektion des Objekts, dargestellt durch ie örtliche Verteilung des Protonenspins. In demselben Signal wird neben er Spindichte auch die Relaxationszeit und, seltener, der sogenannte «che-ııcal shift» erfasst (W.P. Rothwell und P.P. Gentempo 1985; B. Ströbel 985). Der Kern des Wasserstoffatoms besitzt eine charakteristische Eigenro-ıtion, einen Spin, so dass sich Wasser sehr gut als Objekt für Kernresonanz-:xperimente eignet. Zwar besteht die verholzte Zellwand zu etwa 6% aus Vasserstoff, jedoch geht von diesen in Makromolekülen gebundenen Atomen ein störendes Signal aus. Feste Stoffe erzeugen im allgemeinen um Grössen-rdnungen breitere Signale als Flüssigkeiten. Auch das Signal des im Holz-örper gebundenen Wassers (d.h. ein Wassergehalt bis zur Fasersättigung) ist aum sichtbar. In einer Kernspintomographie-Anlage können Schichtbilder les Objektes in beliebiger Richtung erzeugt werden. Eine mechanische Ver-chiebung des Objektes ist dabei nicht notwendig, vielmehr werden die chichtbilder durch die positionsbezogene Signalaufnahme erreicht. Somit önnen in einem festen Objekt die zu untersuchenden Substanzen (zum Bei-piel das Wasser) lokalisiert sowie ihre Konzentration und allfällige Bewegun-en (Strömung) bestimmt werden. Dabei wird das Objekt keinerlei Beein-rächtigung ausgesetzt. Bereits 1979 wurde die *Geschwindigkeit der Wasserbe-vegung* in organischen Baustoffen mit Hilfe der Kernspintomographie unter-ucht (R.J. Gummerson et al. 1979). Es folgten bald Untersuchungen an Gur-enpflanzen (Cucumis sativus L.) (H. Van As 1982 und zahlreiche weitere ırbeiten des gleichen Autors), wobei hier die pulsierte Kernresonanz-Spek-:oskopie angewendet wurde.

Die kernspintomographische Darstellung der Verteilung der Wasserstoff-:erne machte die ersten Fortschritte bei der Untersuchung tierischer und ıenschlicher Körper. Hier gelangte neben dem Wasser auch das Fett zur Dar-ellung. Im Jahre 1984 wurden *Bilder der Wasserverteilung* in einem glasfaser-:rstärkten Epoxidharz veröffentlicht (W.P. Rothwell et al. 1984) und bald arauf, 1985, die ersten Darstellungen der Wasserverteilung in Holzscheiben .J. Kučera und P. Brunner 1985). Derzeit werden an verschiedenen Orten :rnspintomographische Untersuchungen an Holz durchgeführt, wie es bei-ielsweise Arbeiten aus den USA (W.P. Rothwell et al. 1984) und Kanada

(L.D. Hall und V. Rajanayagam 1986; L.D. Hall et al. 1986) belegen. Die letzte Entwicklung auf dem Gebiet der Kernspintomographie ist eine erhebliche Verbesserung der räumlichen Signalauflösung, welche derzeit etwa 30 µm beträgt. Auf dieser Entwicklung basiert auch die neueste Anwendung: die *Kernresonanz-Mikroskopie.*

5.2 Eigene Ergebnisse

Unsere ersten Untersuchungen der Wasserverteilung im Fichten- und Tannenholz wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Spectrospin AG in 8117 Fällanden ZH (Abteilungsleiter Dr. Peter Brunner) am 28.8., 16.9. und 18.9.85 vorgenommen (L.J. Kučera und P. Brunner 1985). Es stand uns dabei eine Kernresonanz-Anlage BIOSPEC BMT 24/40 zur Verfügung. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde eine BIOSPEC BMT 47/30 eingesetzt. Diese Anlage ist mit einem supraleitenden Hochfeldmagneten von 4,7 Tesla Feldstärke ausgestattet, und das Kernresonanzsignal wird durch Hochfrequenzimpulse vom 100 MHz erzeugt. Gestützt auf unser Gesuch bewilligte die Schulleitung der ETH-Z die notwendigen Mittel für die Durchführung einer Vorstudie im Jahr 1986. Diese Mittel erlaubten uns, 15 Messtage an der obenerwähnten Anlage durchzuführen. Im Rahmen dieser Messtage wurden teils methodische Probleme gelöst, teils auch systematische Untersuchungen des Wasserhaushaltes in gesunden und kranken Fichten aus zwei schweizerischen Standorten im Rahmen des NFP 12 «Holz, erneuerbare Rohstoff- und Energiequelle» («Holzeigenschaften geschädigter Fichten») durchgeführt. Gesamthaft wurden ca. 600 Proben vorbereitet und kernspintomographisch dargestellt. Die Ergebnisse betreffen drei Problemkreise und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

5.2.1 Probenvorbereitung und -behandlung

Die maximal mögliche Probendimension von 25 cm Durchmesser wurde aus Gründen einer gewissen Randinhomogenität des Messfeldes auf 12 cm beschränkt (Bild 1). Der Messbereich beträgt in axialer (horizontaler) Richtung ca. 10 cm. Durch Mess-Serien können theoretisch beliebig lange Proben untersucht werden. Praktisch ist die Probenlänge durch die Dimension des Faraday-Käfigs, in welchem sich die Kernresonanz-Anlage befindet, auf ca. 2 m beschränkt. Die kernspintomographische Untersuchung der Proben ist absolut zerstörungsfrei. Hingegen kann die Probenentnahme selber destruktive Eingriffe (Sägen und Spalten von Holzscheiten; Bohrkernentnahme mittels Zuwachsbohrer) verursachen, dies in Abhängigkeit von der Art und Grösse des untersuchten Objektes. Die mechanisch erzeugten Oberflächen müssen versiegelt werden, um Wasserverluste (besonders durch die Querschnittflächen) zu vermeiden. Dies ist besonders dann wichtig, wenn die Proben nicht innerhalb von 1–2 Tagen untersucht werden können. In einem Langzeitversuch wurde der Wasserverlust (ausgedrückt als % des Anfangsgewichtes) der

Fichtenholz-Proben (Holzwürfel, Rundholz-Abschnitte, Bohrkerne) untersucht. Die Gewichtsabnahme der Proben wurde während 8 Wochen wöchentlich und abschliessend nach 8 Monaten festgehalten. Als beste Methode erwies sich die Einbettung der Proben in einem Acrylharz (Gewichtsverlust nach 8 Wochen: 0,6 ± 0,14%), an zweiter Stelle lag eine Paraffin-Einbettung mit zusätzlichem Schutz der Proben durch eine PVC-Folie (Gewichtsverlust nach 8 Wochen: 1,8 ± 0,15%). Eine reine Paraffin-Einbettung war am wenigsten günstig (Gewichtsverlust nach 8 Wochen: 7,1 ± 0,45%). Sämtliche Proben wurden im Kühlschrank bei 6° ± 1 °C aufbewahrt. Die obigen statistisch gesicherten Ergebnisse beziehen sich auf die Holzwürfel. Die Rundholzabschnitte ergaben günstigere, die Bohrkerne weniger günstige, aber immer noch befriedigende Ergebnisse. Erwartungsgemäss war der Gewichtsverlust von Splintholzproben mit 2,6 ± 0,17% grösser als jener der Kernholzproben mit 1,8 ± 0,26% (Angaben nach 7 Wochen Versuchszeit; Paraffin-Einbettung mit PVC-Schutzfolie). Nach mehreren Wochen wiederholte kernspintomographische Aufnahmen von gleichen Proben zeigten überdies, dass eine Umverteilung des Wassers in der Probe (Feuchtigkeitsausgleich durch Diffusion usw.) nicht stattfindet. Es hat sich als für die spätere Interpretation der Ergebnisse sehr nützlich erwiesen, die Proben in Farbaufnahmen (inkl. Probennummer und Massstab) festzuhalten.

5.2.2 Mess- und Auswertungstechnik

Es gehörte zu den ersten Aufgaben, die messtechnischen Parameter der Kernresonanzanlage für das Untersuchungsobjekt Holz zu optimieren. Wir gelangten zu folgenden Parametern:

Schichtdicke	5 mm
Schichtabstand	5 mm
Anzahl Schichten je Aufnahme	4
Anzahl Echos	1

Die weiteren gerätetechnischen Daten müssen den Spezialveröffentlichungen vorbehalten bleiben. Es wurden Tomogramme in den Richtungen transversal, längs-radial und längs-tangential erzeugt, wobei die transversal orientierten sich als weitaus am informativsten erwiesen haben. In den längsorientierten Tomogrammen bewirkte die Schichtdicke von 5 mm bereits eine gewisse Bildunschärfe.

In jedem Radio können schwache oder entfernte Sender durch den Verstärker zur gleichen optimalen Klangstärke gebracht werden wie stärkere oder näher gelegene Sender. Ähnlich werden die vom Objekt ausgestrahlten Kernresonanz-Signale vor der eigentlichen Aufnahme durch einen Verstärker (receiver gain) modifiziert, damit der gesamte Empfindlichkeitsbereich der Anlage optimal ausgenützt wird. Dadurch aber werden Proben mit verschiedenem Wassergehalt unterschiedlich behandelt, was eine nachträgliche Korrektur erfordert. Diese Korrektur erfolgt entweder rechnerisch oder durch die

gleichzeitige Aufnahme eines Standardobjektes. Für die rechnerische Korrektur konnte die folgende Formel ermittelt werden:

$$I_{MK} = I_{MU} * 10^{VS/20}, \text{ wobei}$$

I_{MK} = mittlere korrigierte Signaldichte,
I_{MU} = mittlere unkorrigierte Signaldichte,
VS = Verstärker-Stufe.

Die mittlere unkorrigierte Signaldichte (oder Signalintensität) wird in einer computergesteuerten Bildverarbeitungs-Anlage ermittelt, in welcher die Kernspintomogramme auf vielfältige Art weiterverarbeitet werden können. Als Standardobjekt hat sich ein Gemisch aus normalem und schwerem Wasser (10% H_2O in D_2O) bewährt. Wichtig war für die Wahl des schweren Wassers die Erzielung eines optimalen Gemisches mit Wasser und der Umstand, dass die Resonanz-Frequenzen von ^1H und ^2D völlig verschieden sind. Die Konzentration von Wasser wurde so gewählt, dass das Signal des Standardobjektes knapp unterhalb der maximalen Signalintensität zu liegen kam. Damit wurde der Gegensatz zwischen der Messgenauigkeit des Standards und der Ausnützung des Empfindlichkeitsbereiches optimiert.

5.2.3 Objekt und Aussage

Gegenstand der nachfolgenden Beispiele ist das frei tropfbare Wasser im Holzkörper. Eine Darstellung des gebundenen Wassers ist grundsätzlich möglich, würde jedoch andere Messparameter erfordern (P. Brunner 1987). Zunächst wurde die Methode an folgenden Holzarten getestet: Fichte, Föhre, Tanne; Ahorn, Buche, Eiche, Erle, Hagebuche, Kirschbaum und Ulme. Im allgemeinen konnten stets die Splintholz–Kernholz-Grenze (sofern vorhanden) und der Jahrringbau dargestellt werden. Splintholz–Kernholz-Grenzen sind z.B. in den Bildern 2, 5, 6, 7, 8 und 12 deutlich auszumachen. Die Differenzierung der Jahrringe war besonders im Nadelholz (z.B. Fichte, Bild 5) und im ringporigen Laubholz (z.B. Ulme, Bild 2) deutlich, dies als Folge unterschiedlicher Holzfeuchtigkeit im Früh- und Spätholz. Die einzelnen Jahrringe konnten in den meisten Fällen klar auseinandergehalten werden (z.B. Fichte, Bilder 5, 7 und 14). Nur im Falle von sehr schmalen Jahrringen mit Breiten von 0,1 mm und weniger war es schwierig oder gar unmöglich (z.B. Fichte, Bilder 6 und 8). Im zerstreutporigen Laubholz war dagegen die Differenzierung der Jahrringe undeutlich bis fehlend (z.B. Hagebuche, Bild 3). Als weitere anatomische Strukturen konnten die Harzkanäle bei der Fichte (Bilder 5 und 14) und Föhre und, interessanterweise, die Markstrahlen bei der Erle und Hagebuche (Bild 3) ausgemacht werden.

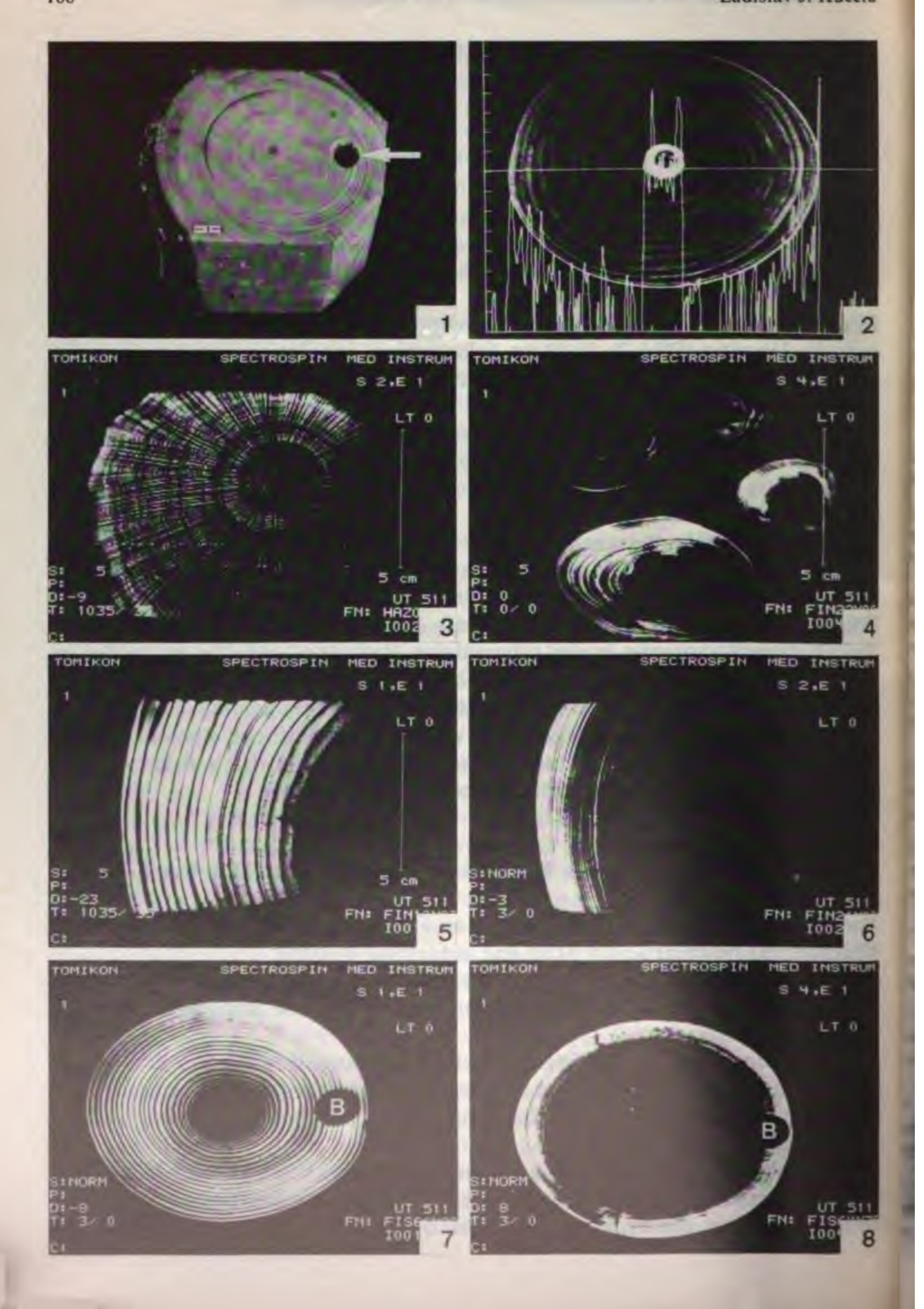
Die Methode der kernspintomographischen Darstellung des freien Wassers im Holz wurde im Rahmen einer Untersuchung der Holzqualität gesunder und geschädigter Fichten eingesetzt. Dabei zeigte es sich, dass die Splintholzbreite – ähnlich wie die Breite der in den letzten Jahren gebildeten Jahrringe – mit dem Gesundheitszustand der untersuchten Bäume korreliert ist. Gesunde Bäume mit geringem Nadelverlust präsentierten breitere Jahrringe und Splint-

olzzonen (Bilder 5 und 7) als kranke Bäume mit hohem Nadelverlust, in de-
en oft extrem schmale Jahrringe und schmale Splintholzzonen manchmal
it unregelmässiger Wasserverteilung beobachtet wurden (Bilder 6 und 8).
llerdings hatte die beschriebene Beziehung einen statistischen Charakter
id konnte nicht in jedem Einzelfall bestätigt werden. Unregelmässigkeiten
er Wasserverteilung und sog. «trockene Jahrringe», die als Frühstadium von
aumschäden gewertet werden, konnten besonders häufig im Wurzelholz
ild 4), gelegentlich auch im Stamm- und Astholz beobachtet werden.
Interessante Einsichten ergaben sich bei der Untersuchung einiger Sonder-
erkmale des Baumwachstums, der Baumkrankheiten und Holzschäden.
ine untersuchte ca. 10jährige Ulme zeigte klar eine Nasskernbildung im in-
ersten Jahrring (Bild 2). Weitere Erkenntnisse wurden gewonnen über den
influss von Merkmalen wie Gesundheitszustand des Astes (Bilder 9 und 10),
arztasche und Druckholz (Bilder 11 und 12), Stammverletzung (Bilder 13
id 14) sowie Pilzbefall (Bilder 15 und 16) auf die Verteilung des Wassers
id Funktionsfähigkeit der Splintholzzone im Fichtenholz. Dabei hat es sich
zeigt, dass der funktionell gestörte Bereich das Ausmass der sichtbar betrof-
nen Holzzone meistens übersteigt.
In einem Trocknungsversuch an Fichtenholzproben (Bilder 17–24) konnte
ie unterschiedliche Trocknungsgeschwindigkeit des Früh- und Spätholzes
im erstenmal visualisiert werden. Das mit Hoftüpfeln besser ausgestattete
rühholz trocknet wesentlich rascher als das Spätholz. Ferner vollzieht sich
er Trocknungsvorgang in der tangentialen Richtung schneller als in der ra-
ialen Richtung, dies als Folge der nahezu exklusiven Lage der Hoftüpfel in
en radialen Zellwänden der Tracheiden, womit der tangentiale Wassertrans-
ort begünstigt wird. Die Ergebnisse würden eine einfache Berechnung der
rockungsgeschwindigkeit ermöglichen und somit Hinweise auf das zeitliche
uftreten von Spannungen im trocknenden Holz liefern.

Aufgabenstellungen für eine Kernresonanz-Anlage in der Holzforschung

orgängig zur Formulierung möglicher Forschungsprojekte sollen hier die
orzüge der beschriebenen Methode aufgelistet werden.

1. Eine Probenvorbehandlung gibt es nicht, ausser im Falle, dass der Was-
ergehalt der Proben aus organisatorischen Gründen konserviert werden
iuss.
2. Die Messung ist mit keinerlei Beeinträchtigung des Objektes verbunden,
aher kann sie auch beliebig oft am gleichen Objekt wiederholt werden.
3. Es können relativ grosse Proben mit mehreren dm³ Volumen untersucht
erden.
4. Dank der guten Auflösung können anatomische Strukturen, aber auch
n Holzkörper verborgene Merkmale sichtbar gemacht werden.
5. Es wird in relativ kurzer Zeit (ca. 5–8 Min.) eine hohe Informations-


1
2
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 2,E 1
LT 0
5 cm
S: 5
P:
D:-9
UT 511
C:
3
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 4,E 1
LT 0
5 cm
S: 5
P:
D: 0
T: 0/ 0
UT 511
C:
4
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 1,E 1
LT 0
5 cm
S: 5
P:
D:-23
UT 511
C:
5
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 2,E 1
LT 0
S:NORM
P:
D:-3
T: 3/ 0
UT 511
C:
6
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 1,E 1
LT 0
B
S:NORM
P:
D:-8
T: 3/ 0
UT 511
C:
7
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 4,E 1
LT 0
B
S:NORM
P:
D: 8
T: 3/ 0
UT 511
C:
8

Form und Grösse einer Stammholzprobe für die kernspintomographische (NMR) Unnung. Das Bohrloch (Pfeil) dient der Aufnahme des Glasröhrchens mit der Referenzlösung. = 1 cm.

Standardized shape and size of a specimen for the investigation in a nuclear magnetic ace (NMR) tomograph. The bore hole (arrow) is designed to accommodate the glass tube e standard sample. Marker = 1 cm.

Ulme, ca. 10jährig, Querschnitt, NMR-Aufnahme, Frühstadium der Nasskernbildung tralen Stammbereich.

Elm, approximately 10 years old, transverse section, NMR-tomograph. Early stage in elopment of wet heart in the center of the stem.

Hagebuche, Querschnitt, NMR-Aufnahme. Die Markstrahlen zeichnen sich durch eihen Wassergehalt aus. Erkennbar ist die schwach ausgebildete Spannrückigkeit.

Hornbeam, transverse section, NMR-tomograph. The wood rays exhibit a comparative-water content. Barely noticeable is the fluted trunk growth.

Fichte, Wurzelholz, Querschnitt, NMR-Aufnahme. Vier Wurzeln von verschiedenem gungsgrad mit unregelmässiger Wasserverteilung im Querschnitt.

Spruce, root wood, transverse section, NMR-tomograph. Four roots exhibiting various of damage as indicated by the limited water content and irregular water distribution in sverse sections.

Fichte, herrschend, Nadelverlust 0%, Alter 44 Jahre, Nordradius aus 7 m Höhe, Quer-, NMR-Aufnahme. Breite Jahrringe und breiter Splintholzbereich mit gleichmässiger Wasilung.

Spruce, dominant, needle loss 0%, age 44 years, sample from the northern direction at ght, transverse section, NMR-tomograph. Wide growth rings and a broad sapwood area niform water distribution.

Fichte, beherrscht, Nadelverlust 65%, Alter 89 Jahre, Nordradius aus 7 m Höhe, Quer-NMR-Aufnahme. Schmale Jahrringe und schmale Splintholzzone mit ungleichmässiger rteilung.

Spruce, dominated, needle loss 65%, age 89 years, sample from the northern direction height, transverse section, NMR-tomograph. Narrow growth rings and a slim sapwood th an irregular water distribution.

Fichte, beherrscht, Nadelverlust 10%, Alter 158 Jahre, Stammabschnitt aus 27 m Höhe, hnitt, NMR-Aufnahme. Trotz relativ schmaler Jahrringe eine breite Splintholzzone mit mässiger Wasserverteilung. Bohrloch (B) für die Referenzlösung.

Spruce, dominated, needle loss 10%, age 158 years, trunk portion from 27 m height, se section, NMR-tomograph. In spite of the rather slim growth rings a wide sapwood th an even water distribution. Bore hole (B) for the standard sample.

Fichte, herrschend, Nadelverlust 60%, Alter 214 Jahre, Stammabschnitt aus 38 m Höhe, hnitt, NMR-Aufnahme. Extrem schmale Jahrringe und eine schmale Splintholzzone mit mässiger Wasserverteilung. Bohrloch (B) für die Referenzlösung.

Spruce, dominant, needle loss 60%, age 214 years, trunk portion from 38 m height, se section, NMR-tomograph. Exceedingly narrow growth rings and a slim sapwood area irregular water distribution. Bore hole (B) for the standard sample.

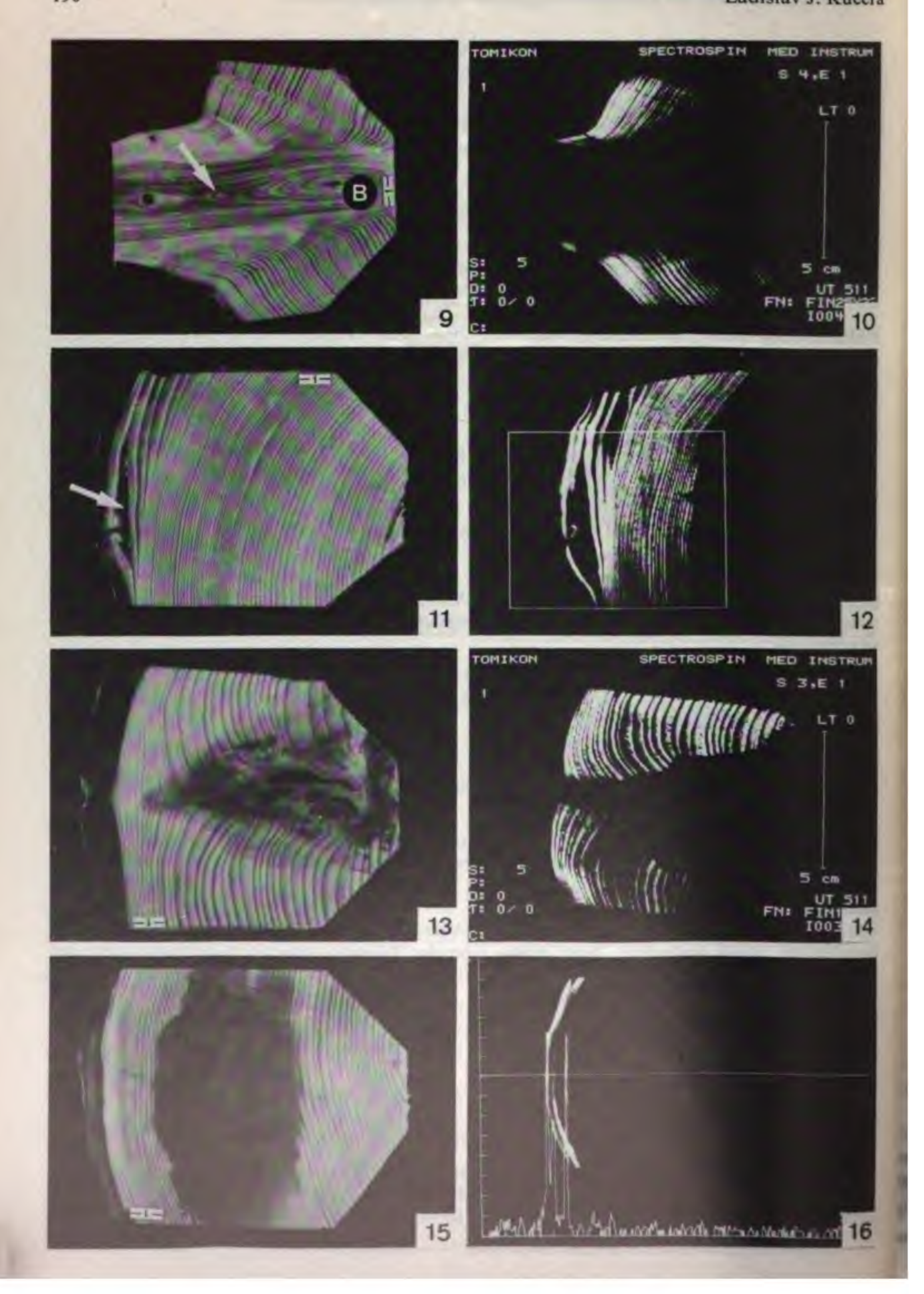

9
B
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 4,E 1
LT 0
5 cm
UT 511
10
11
12
TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
S 3,E 1
LT 0
5 cm
UT 511
13
14
15
16

Bild 9 Fichte, Astknotenholz, Radialschnitt. Die zentrale Partie des Astknotenholzes (Pfeil) ist stark verharzt. Die Jahrringe sind im Astholzbereich wesentlich schmäler als im benachbarten Stammholzbereich. Bohrloch (B) für die Referenzlösung. Marke = 1 cm.

Fig. 9 Spruce, branch knot wood, radial section. The central area of the knot wood (arrow) is heavily resin-impregnated. The growth rings are narrowing from stem area towards the branch area. Bore hole (B) for the standard sample. Marker = 1 cm.

Bild 10 NMR-Aufnahme der Probe aus dem Bild 9. Die wasserführende Splintholzzone besteht im Stammholzbereich aus etwa 20 bis 30 Jahrringen. Dagegen ist die Wasserversorgung des Astes nahezu völlig unterbrochen.

Fig. 10 NMR-tomograph of the sample in figure 9. The water conducting sapwood area consists in the main trunk of 20 to 30 growth rings. In contrast, the water supply is nearly interrupted in the branch wood.

Bild 11 Fichte, Querschnitt. Grosse Harztasche (Pfeil) und mehrere Jahrringe mit Druckholz (oben links). Marke = 1 cm.

Fig. 11 Spruce, transverse section. Large resin pocket (arrow) and a few growth rings containing compression wood (top left). Marker = 1 cm.

Bild 12 NMR-Aufnahme der Probe aus dem Bild 11. Deutliche Störung der Wasserversorgung im Bereich der Harztasche. Die druckholzhaltigen Zonen enthalten kein freies Wasser.

Fig. 12 NMR-tomograph of the sample in figure 11. Water conduction is clearly limited in the resin pocket area. Compression wood does not contain free water.

Bild 13 Fichte, Querschnitt. Grosse, vollständig überwallte Stammverletzung mit eingewachsener Rinde und einer Verfärbung, welche einen Pilzbefall vermuten lässt. Marke = 1 cm.

Fig. 13 Spruce, transverse section. Large wound in stem wood, completely healed over. Included is in the wounded area bark tissue. The colour of the wood in this area indicates a fungal attack. Marker = 1 cm.

Bild 14 NMR-Aufnahme der Probe aus dem Bild 13. Die Verletzung beeinflusst die Wasserleitung im Xylem deutlich über die makroskopisch sichtbar beeinträchtigte Zone hinaus. Selbst in scheinbar normalen Jahrringen in der Kambiumnähe ist die Wasserleitung unterbrochen.

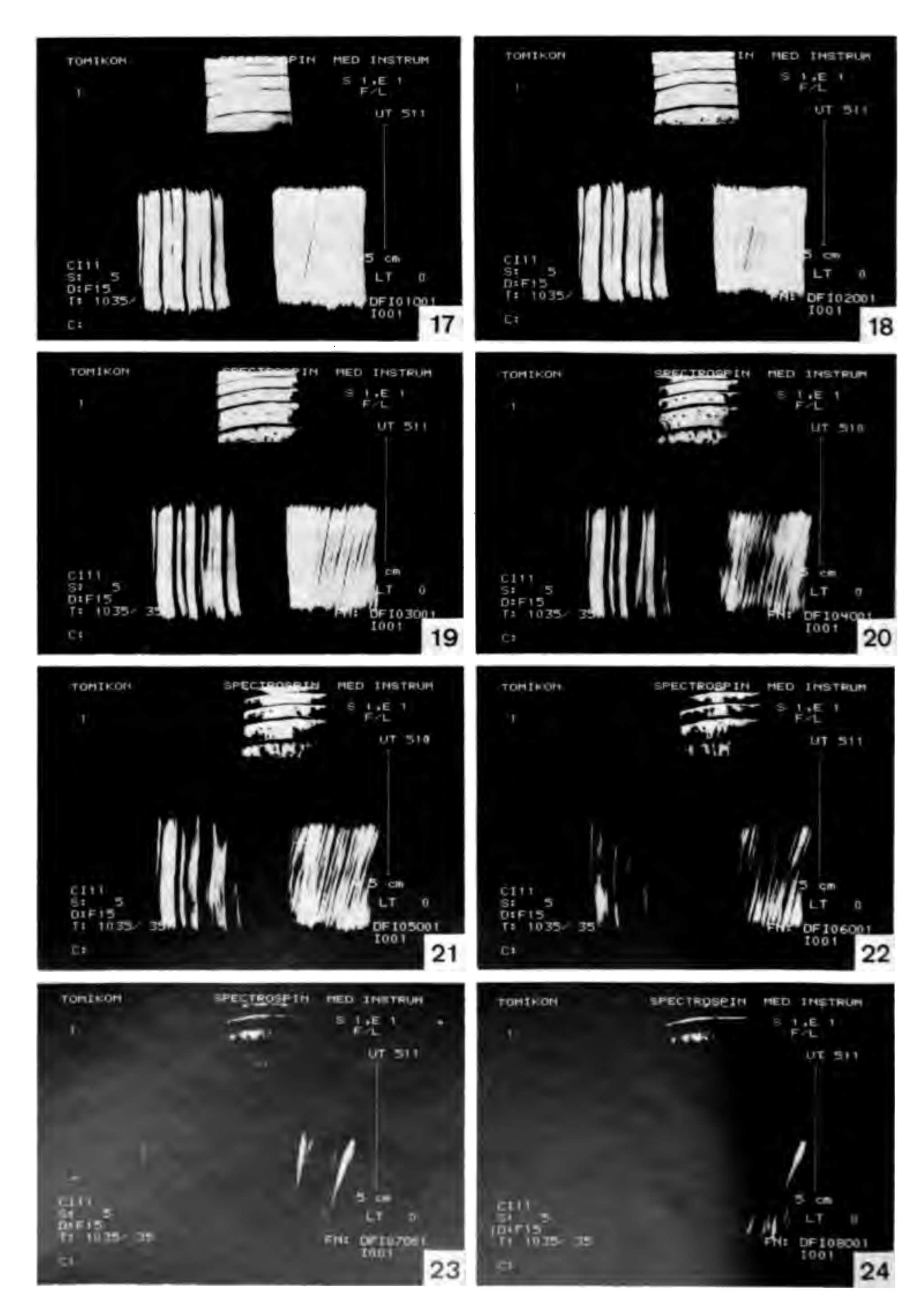
Fig. 14 NMR-tomograph of the sample in figure 13. The water conduction in the xylem is affected by the wound. The non-conductive sapwood zone extends far beyond the macroscopically discernible wound tissue area. Water conduction is interrupted even in seemingly unimpaired growth rings close to the cambium.

Bild 15 Fichte, Querschnitt. Fortgeschrittener Pilzbefall in einem Baum. Eine etwa 2 cm breite Holzschicht zwischen dem Kambium und der pilzbefallenen Zone scheint unbeeinträchtigt zu sein. Starke Abnahme der Jahrringbreiten in den letzten 30–40 Jahren. Marke = 1 cm.

Fig. 15 Spruce, transverse section. Advanced fungal attack in the stem wood. A 2 cm-sapwood-area in the vicinity of the cambium seems to be unimpaired. Distinct reduction of the growth-ring widths over the last 30–40 years. Marker = 1 cm.

NMR-Aufnahme der Probe aus dem Bild 15. Die äussere, scheinbar unbeeinträchtigte [illegible]schicht enthält kaum noch freies Wasser. Die Wasserleitung ist auf die 1–3 letztgebildeten [illegible]e beschränkt.

NMR-tomograph of the sample in figure 15. The outer, seemingly unimpaired sapwood zone contains hardly any free water. Water conduction is limited to the 1–3 last grown annual rings.


TOMIKON
SPECTROSPIN
MED INSTRUM
UT 511
5 cm
LT 0
I001
17
18
19
20
21
22
23
24

17–24 Fichte, Splintholz, Probengrösse längs:radial:tangential = 50 mm:35 mm:35 mm, Pro-
ientierung in den Bildern: transversal (oben), längs-radial (links) bzw. längs-tangential
s). In allen 8 Aufnahmen ist etwa der gleiche Bereich in der Probenmitte abgebildet.

17–24 Spruce, sapwood, sample dimensions longitudinal:radial:tangential = 50 mm:
:35 mm, sample arrangement in the figures: transversal (top), radial-longitudinal (left)
ential-longitudinal (right). Each of the figures shows approximately the same tissue area
middle part of the sample.

17 Ursprüngliche Wasserverteilung in den frischgewonnenen Holzproben. Die Oberfläche
oben wurde nicht versiegelt.

17 Original water distribution in the freshly cut samples. The surfaces of the samples have
een sealed.

18 Wasserverteilung in den Proben nach einer Stunde Aufenthalt in einem Trocken-
nk bei 80°C.

18 Water distribution in the samples after 1 hour drying at 80°C.

19 Wasserverteilung in den Proben nach zwei Stunden Trocknungszeit bei 80°C. Der Was-
t ist im Frühholzbereich der Jahrringe rascher als im Spätholzbereich, wodurch die Was-
lung im Randbereich der Probe ein sägeblattförmiges Aussehen annimmt. Die Ursache
ist die unterschiedliche Grösse und Häufigkeit der Hoftüpfel im Früh- und Spätholz.

Water distribution in the samples after 2 hours drying at 80°C. Water loss is faster in
wood than in late wood. The reason for this lies in the different size and number of the
red pits in the different zones of a growth ring. This leads to a wavy distribution of the free
at the edge of the sample.

20 Wasserverteilung in den Proben nach drei Stunden Trocknungszeit bei 80°C. Die Ten-
s dem Bild 19 hat sich verstärkt.

20 Water distribution in the samples after 3 hours drying at 80°C. The trend exhibited in
19 became amplified.

21 Wasserverteilung in den Proben nach vier Stunden Trocknungszeit bei 80°C. Die Quer-
form mit freiem Wasser hat sich von quadratisch (Bild 16) zu backsteinförmig gewandelt.
entiale Trocknungsgeschwindigkeit übertrifft die radiale deutlich, da die Hoftüpfel sich
usschliesslich in den radialen Zellwänden befinden.

Water distribution in the samples after 4 hours drying at 80°C. The rate of drying in the
l direction distinctly exceeds the rate of drying in the radial direction due to the virtually
e position of the bordered pits in the radial cell walls, thus enhancing the tangential water
ion. As a result, the free water containing area in the transverse section has changed from
ic to brick-shaped (figure 16).

22 Wasserverteilung in den Proben nach vier Stunden Trocknungszeit bei 80°C und einer
de Trocknungszeit bei 105°C.

22 Water distribution in the samples after 4 hours drying at 80°C and 1 hour drying at
C.

23 Wasserverteilung in den Proben nach vier Stunden Trocknungszeit bei 80°C und zwei
n Trocknungszeit bei 105°C. Freies Wasser ist nur noch im Spätholzbereich einiger Jahr-
orhanden.

Water distribution in the samples after 4 hours drying at 80°C and 2 hours drying at
Free water content is limited to the late wood areas of a few growth rings.

Wasserverteilung in den Proben nach vier Stunden Trocknungszeit bei 80°C und drei
Trocknungszeit bei 105°C. Die Proben enthalten nur noch vereinzelte Spuren von freiem

Water distribution in the samples after 4 hours drying at 80°C and 3 hours drying at
he samples contain only a few traces of free water.

dichte (im Falle unserer Proben entsprechend ca. 10 000 gravimetrischen Wassergehaltsbestimmungen) erzielt.

6. Durch den Einsatz der Bildverarbeitungs-Anlage können routinemässig zweidimensionale Bilder der Wasserverteilung erzeugt werden.

7. Die Digitalisierung der analogen Information ist nach den beschriebenen Methoden (rechnerisch resp. mit Standardobjekt) möglich.

8. Die Interpretation der Ergebnisse ist einfach, weil es sich hier um eine direkte Methode handelt.

9. Mit Hilfe einer Kernspintomographie-Anlage können nicht nur die Wasserverteilung, sondern auch der Wassergehalt der Probe sowie die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers ermittelt werden.

6.1 Baumphysiologie

Ein Schwerpunkt der baumphysiologischen Forschung bietet sich in der natürlichen und durch Umweltbelastung beschleunigten Baumalterung und der damit einhergehenden Splintholz-Kernholz-Umwandlung. Als Fernziel wäre eine zuverlässige Diagnosemethode der Baumvitalität anzustreben. Denkbar wären folgende Projekte:

- Splintholzanteil und Wassergehalt im Splintholz als Vitalitätsindikator des Baumes unter Berücksichtigung des Standortes und interner Faktoren (Baumart, Baumalter, soziale Stellung des Baumes, vertikale Position der Probe im Baum).
- Wasserleitung in peripheren Baumteilen (Wurzeln, Astknotenholz, Astholz).
- Geschwindigkeit des Wassertransportes in Abhängigkeit von äusseren Bedingungen wie Lichtgenuss, Temperaturen und Luftfeuchtigkeit (dargestellt an Topfpflanzen).
- Feinverteilung des Wassers im Jahrring (Kernresonanz-Mikroskopie).

Mit Hilfe einer mobilen Anlage, deren Bau nach Ansicht von Fachleuten in den nächsten Jahren möglich sein sollte, könnte die

- Tages- und Jahresperiodizität des Wasserhaushaltes im stehenden Baum (Wassergehalt, Strömungsgeschwindigkeiten)

untersucht werden.

6.2 Holzkunde

Das Schwergewicht sollte hier auf die eingehende Untersuchung der Holzeigenschaften bei hohen Holzfeuchtigkeiten gelegt werden, ein Gebiet, das bislang zu wenig Beachtung fand, obschon relativ viel Holz «in grünem Zustand» verwendet wird.

- Einfluss hoher Feuchtigkeitswerte und unregelmässiger Wasserverteilung auf die Festigkeits- und Isolierwerte des Holzes.
- Zeitlicher Ablauf der Holzzerstörung durch Pilze, dargestellt anhand der Veränderungen des Wassergehaltes.

6.3 Holztechnologie

Das Hauptgebiet wäre hier sicher die natürliche und technische Holztrocknung. Trotz aller Forschungsprojekte befindet sich nämlich die Holztrocknung immer noch in einer Entwicklungsphase. Die Ursache wesentlicher Trocknungsfehler wie Kollaps (z.B. beim Nussbaum oder Eukalyptus) oder Farbveränderungen (z.B. bei der Eiche) konnte bislang nicht einwandfrei geklärt oder gar behoben werden.

- Wassergehalt und Feuchtigkeitsverteilung im Rundholz im Verlauf der natürlichen Trocknung in Abhängigkeit von äusseren Bedingungen.
- Einfluss des Trocknungsgefälles und weiterer Trocknungsparameter auf das Auftreten gewisser Trocknungsfehler (Verfärbungen, Kollaps, Verschalung) untersucht anhand der Wasserverteilung in den Proben.
- Verteilung von wasserlöslichen Schutzmitteln im imprägnierten Holz (PTT-Masten).

7 Literatur

Anil Kumar, Welti, D. and Ernst, R. (1975), NMR Fourier zeugmatography. Journal of magnetic resonance *18:* 69–83.

Bauch, J., Klein, P., Frühwald, A. und Brill, H. (1978), Veränderungen der Holzeigenschaften von Weisstanne (Abies alba Mill.) durch das «Tannensterben». Allgemeine Forst-Zeitschrift *33:* 1448–1449.

Bodenhausen, G. (1985), Warum ist die Kernresonanz heute so populär? ETH-Bulletin (194): 13–14.

Bosshard, H.H. (1961), Mikrotechnologische Untersuchungen der Gefüge- und Feuchtigkeitsveränderungen in den imprägnierten Schwellenhölzern. Holz als Roh- und Werkstoff *19* (9): 357–370.

Brunner, P. (1987), Persönliche Mitteilung.

Chevallier, E. (1980), Degats aux arbres de la ville de Zurich: L'exemple du robinier faux-acacia (Robinia pseudacacia L.). Travail de diplôme non publié, EPF-Z. 72 p.

Eslyn, W.E. (1959), Radiographical determination of decay in living trees by means of the thulium X-ray unit. Forest Science *5:* 37–47.

Frühwald, A. und Bauch, J. (1984), Über die Qualität von Holz aus Waldschadensgebieten. Vortrag an der 12. Dreiländer-Holztagung, Augsburg, 11 S.

Gummerson, R. J., Hall, C., Hoff, W.D., Hawkes, R., Holland, G.N. and Moore, W.S. (1979), Unsaturated water flow within porous materials observed by NMR imaging. Nature *281* (5726): 56–57.

Hall, L.D. and Rajanayagam, V. (1986), Evaluation of the distribution of water in wood by use of three dimensional proton NMR volume imaging. Wood Science and Technology *20:* 329–333.

Hall, L.D., Rajanayagam, V., Stewart, W.A. and Steiner, P.R. (1986), Magnetic resonance imaging of wood. Canadian Journal of Forest Research *16* (2): 423–426.

Hall, L.D., Rajanayagam, V., Stewart, W.A., Steiner, P.R. and Chow, S. (1986), Detection of hidden morphology of wood by magnetic resonance imaging. Canadian Journal of Forest Research *16* (3): 684–687.

Hapla, F. (1986), Splint- und Kernanteile an Kiefern unterschiedlicher Immissionsschadstufen. Holz als Roh- und Werkstoff *44* (9): 361.

Hösli, J.P., Laroche, D. and Gagnon, R. (1987), Determination of sap flow velocity in trees using negative temperature thermistors. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen *138* (3): 229–237.

Huber, B. und Prütz, G. (1938), Über den Anteil von Fasern, Gefässen und Parenchym am Aufbau verschiedener Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff *1* (10): 377–381.

Huy, V.-R. (1985), Measurement of moisture content in resinous wood. Forest Products Research International-Achievements and the Future. Proceedings Volume 1, Report 16–20, Pretoria, 10 p.

Kollmann, F. und Höckele, G. (1962), Kritischer Vergleich einiger Bestimmungsverfahren der Holzfeuchtigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff *20* (12): 461–473.
Kučera, L.J. (1984), Waldsterben – Holzeigenschaften – Holzqualität. SAH Bulletin *12* (4): 2–28.
Kučera, L.J. (1985), Kernspintomographie und elektrische Widerstandsmessung als Diagnosemethoden der Vitalität erkrankter Bäume. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen *137* (8): 673–690.
Kučera. L.J. und Brunner, P. (1985), Kernspintomographie zur Untersuchung kranker Bäume. Neue Zürcher Zeitung *206* (252): 89.
Lausch, E. und Mayer, Th. (1985), Der Wald auf dem Prüfstand. GEO (10): 142–168.
Lauterbur, P. (1973), Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. Nature *242:* 190–191.
Lyr, H., Polster, H. und Fiedler, H.-J. (1967), Gehölzphysiologie. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena. 444 S.
Miller, B.D., Taylor, F.L. and Popeck, R.A. (1965), A sonic method for detecting decay in wood poles. American Wood-Preservers' Association Proceedings *61:* 109–115.
Nanassy, A.J. (1978), Temperature dependence of NMR measurement on moisture in wood. Wood Science *11* (2): 86–90.
Nöldechen, A. (1986), Pflanzenbeobachtung durch Wände und Gefässe hindurch. Technische Rundschau *37:* 44–45.
Rademacher, P. (1986), Morphologische und physiologische Eigenschaften von Fichten (Picea abies (L.) Karst.), Tannen (Abies alba Mill.), Kiefern (Pinus sylvestris L.) und Buchen (Fagus sylvatica L.) gesunder und erkrankter Waldstandorte. Dissertation an der Universität Hamburg, Geesthacht. 274 S.
Rothwell, W.P., Holecek, D.R. and Kershaw, J.A. (1984), NMR imaging: Study of fluid absorption by polymer composites. Journal of Polymer Sciene: Polymer Letters Edition *22* (1): 241–247.
Rothwell, W.P. and Gentempo, P.P. (1985), Nonmedical applications of NMR imaging. Bruker Report (1): 46–51.
Schnell, G.R., Arnold, M. und Sell, J. (1987), Wassergehalt und Splintanteil unterschiedlich vitaler Fichten und Tannen von vier schweizerischen Standorten. EMPA Dübendorf, Bericht Nr. 115/15, 21 S.
Sharp, A.R., Riggin, M.T., Kaiser, R. and Schneider, M.H. (1978), Determination of moisture content of wood by pulsed nuclear magnetic resonance. Wood and Fibre *10* (2): 74–81.
Skutt, H.R., Shigo, A.L. and Lessard, R.A. (1972), Detection of discolored and decayed wood in living trees using a pulsed electric current. Canadian Journal of Forest Research *2:* 54–56.
Ströbel, B. (1985), Physikalische Grundlagen der NMR-Tomographie. Bruker Medical Report (1): 7–12.
Van As, H. (1982), NMR, water and plants. Ph.D. thesis at the Landbouwhogeschool, Wageningen. 131 p.
Vermaas, H.F. (1984), The influence of sample density on the D.C. resistance of wood. Holzforschung *38* (2): 109–112.
Welling, J. (1986), Kontinuierliche Messung von Holzfeuchteprofilen während der Schnittholztrocknung. Holz als Roh- und Werkstoff *44* (9): 361.

PD Dr. Ladislav J. Kučera, Institut für Wald- und Holzforschung, Fachbereich Holzkunde und Holztechnologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/3: 197–215

Kopernikanische oder Keplersche Wende? – Keplers Kosmologie, Philosophie und Methodologie[1]

Jürgen Mittelstrass, Universität Konstanz

Die Wissenschafts- und Geistesgeschichte verbindet mit dem Namen des Kopernikus eine fundamentale Veränderung in theoretischen und methodologischen Dingen. Dabei wird übersehen, dass das Kopernikanische Programm in Wahrheit ein konservatives Programm ist und eine entsprechende Revolution erst im Rahmen der Keplerschen Astronomie stattfindet. Während Kopernikus noch einem antiken astronomischen Forschungsprogramm zu neuer Geltung verhelfen wollte, bricht Kepler mit diesem Programm und leitet damit eine neue Entwicklung ein, die auch in physikalischer Hinsicht weit über die bisherige Astronomie hinausführt. Zur Verdeutlichung einer «Keplerschen Wende» dient die Darstellung der kinematischen und dynamischen Erklärungen Keplers. Weitere Abschnitte bilden der Keplersche Fortschritt, die Harmonien des Kosmos und die Keplersche Einheit von Naturphilosophie und Naturerklärung.

Copernican or Keplerian Revolution? – Kepler's cosmology, philosophy and methodology

In the history of science and ideas the name Copernicus stands for a fundamental change in theoretical and methodological matters. Here, the fact is overlooked that the Copernican programme is in reality a conservative one and that the revolution in question takes place no earlier than within the framework of the Keplerian astronomy. Copernicus tries to revalidate an old research programme in astronomy, whereas Kepler breaks with this programme and starts with a new development which, from the point of view of physics too, leads far beyond classical astronomy. In order to illustrate a «Keplerian revolution» attention is paid to Kepler's kinematical and dynamical explanations. Further passages deal with the Keplerian achievements, the harmonies of the cosmos and the Keplerian unity of philosophy and science of nature.

1 «Kopernikanische Wende»?

Des Kopernikus Betrachtungen über die revolutiones, d. h. die «Umwälzungen» bzw. Kreisbewegungen, der Planeten ist in der auch auf metaphorische Prägnanz bedachten Kopernikus-Rezeption und Kopernikus-Deutung zur Kopernikanischen «Revolution» geworden oder zur «Kopernikanischen Wende», wie eine andere, vielbenutzte Formel lautet. Sie geht auf eine Bemerkung Kants zurück, mit der dieser in der Vorrede zur zweiten Auflage der «Kritik der reinen Vernunft» seine neue erkenntnistheoretische, nämlich *transzendentale* Einstellung, wonach sich «die Gegenstände (...) nach unserem Erkenntnis richten» müssen, durch Hinweis auf Kopernikus erläutert, «der, nachdem es mit der Erklärung der Himmelsbewegungen nicht gut fort wollte, wenn er annahm, das ganze Sternheer drehe sich um den Zuschauer, versuchte, ob es nicht besser gelingen möchte, wenn er den Zuschauer sich drehen, und dagegen die Sterne in Ruhe liess»[2]. «Kopernikanisch» stellt sich

[1] Vortrag im Rahmen des Wissenschaftstheoretischen Kolloquiums (Die Kopernikanische Revolution in der Astronomie) der ETH Zürich am 1. Juni 1988.

[2] Kritik der reinen Vernunft B XVI (wird im folgenden abgekürzt mit KrV und wie üblich nach der Originalpaginierung zitiert: KrV A = 1. Auflage 1781, KrV B = 2. Auflage 1787).

Kant in seiner Transzendentalphilosophie auf den Standpunkt, dass die «Bedingungen der *Möglichkeit der Erfahrung* überhaupt (...) zugleich Bedingungen der *Möglichkeit der Gegenstände der Erfahrung*» sind[3], apriorische Leistungen des Erkenntnissubjekts mithin die Objektivität der erfahrungsbezogenen Gegenstandserkenntnis bestimmen. Die Kopernikanische Wende ist insofern Beispiel einer «Revolution der Denkart», die Kant auf dem Felde der Astronomie durch das Kopernikanische System und auf dem Felde der Philosophie durch seine «Kritik der reinen Vernunft» geleistet sieht und die er im gleichen Zusammenhang durch Hinweise z. B. auf die Thaletische Geometrie, d. h. die Thales von Milet zugeschriebene Elementargeometrie, und die Galileische Physik erläutert[4].

Kants philosophische Einschätzung findet auf mannigfache Weise ein literarisches Echo. Nach Lichtenberg hat der Frauenburger Domherr «mit Vernunft und Geometrie bewaffnet» eine zweitausendjährige Geschichte des Irrtums siegreich beendet[5]; «unter allen Entdeckungen und Überzeugungen», schreibt Goethe, «möchte nichts eine grössere Wirkung auf den menschlichen Geist hervorgebracht haben als die Lehre des Kopernikus»[6]. Mit Kopernikus, so scheint es, beginnt nicht nur eine neue Astronomie, sondern auch ein neues Denken und eine neue Zeit.

Wer so denkt und so schreibt, bewegt sich mit seinen Betrachtungen in der *Geistesgeschichte* oder Mentalitätsgeschichte, nicht in der *Wissenschaftsgeschichte.* Etwas, das wissenschaftshistorisch klar und unbestritten zu sein scheint, wird zum Signum einer wahrhaft epochalen Umwälzung, einer «Revolution», die nicht nur die Wissenschaft, sondern auch das Bewusstsein, nicht nur die astronomische Forschung, sondern auch den Weltgeist erfasst. Wer vermag da zu widerstehen? In der Tat hat sich nicht nur die Geistesgeschichte, sondern auch die Wissenschaftsgeschichte längst auf eine derartige Beurteilung eingestellt. Auch in Kuhns einflussreicher Theorie der Wissenschaftsentwicklung nimmt die Kopernikanische Astronomie die Rolle eines neuen Paradigmas, einer «revolutionären» Sicht der Dinge ein[7].

Gegen eine derartige Beurteilung lassen sich gewichtige Einwände geltend machen. Diese sprechen nicht die hohe Sprache der Geistesgeschichte oder einer «Philosophie» der Wissenschaftsgeschichte, sondern die der Wissenschaftsgeschichte selbst. Und in dieser Wissenschaftsgeschichte sieht die Ko-

[3] KrV B 197, vgl. A 111.

[4] KrV B XIff., B XXII.

[5] Gesammelte Werke, I–II, ed. W. Grenzmann, Baden-Baden 1956, II, 447.

[6] Materialien zur Geschichte der Farbenlehre, in: Sämtliche Werke (Jubiläumsausgabe), I–XL, Stuttgart/Berlin 1902–1912, XL, 185.

[7] Vgl. Th. S. Kuhn, The Structure of Scientific Revolutions, Chicago [2]1970, 68ff., 149f. (dt. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Frankfurt [2]1976, 98ff., 198). In seiner ausführlichen Darstellung der Kopernikanischen Astronomie weist Kuhn selbst auf zahlreiche eher traditionelle Elemente dieser Astronomie hin (The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought, Cambridge Mass. 1957 [dt. Die Kopernikanische Revolution, Braunschweig 1981]).

pernikanische «Revolution» oder die Kopernikanische «Wende» anders aus – sie trägt (wenn man sich nur mit der Astronomiegeschichte näher befasst) vertraute Züge. Eine «Revolution» der astronomischen «Denkart» weist hier mindestens ebensosehr zurück (in die Geschichte der Astronomie) wie nach vorne (in eine neue Astronomie und in ein neues Denken). Zwei Argumente mögen dies verdeutlichen[8].

Die Kopernikanische Astronomie, so das erste Argument, stellt eine *heliozentrische* Alternative zu der bis dahin geltenden, kinematisch durch die Ptolemaiische Astronomie, dynamisch durch die Aristotelische Physik bestimmten *geozentrischen* Erklärung planetarischer Bewegungen dar. Die Möglichkeit einer derartigen Alternative war in der Geschichte der Astronomie seit Aristarch bekannt; sie blieb jedoch bedeutungslos, weil ein heliozentrisches System im Rahmen der Aristotelischen Physik, zu der es ihrerseits keine ernstzunehmende Alternative gab, dynamisch nicht interpretierbar war. Der Weg zu einer neuen Astronomie musste also auch über eine neue Physik führen. Als allein kinematische Alternative blieb das Kopernikanische System unvollständig und in seiner Geltung eingeschränkt. Kopernikus wusste das, gab sich an dieser Stelle aber mit einer (schwach begründeten) «Realismus»-Behauptung zufrieden. Er hielt im Gegensatz etwa zu Osianders umstrittenem Hinweis auf den *hypothetischen* (weil nur kinematisch begründeten) Charakter der Kopernikanischen Astronomie im Vorwort zur Ausgabe von «De revolutionibus orbium caelestium» (1543) und der späteren, zugleich an die Adresse Galileis gerichteten entsprechenden Intervention Bellarmins an dem vor allem durch seinen «Schüler» Rheticus nachdrücklich vertretenen Anspruch fest, dass sein heliozentrisches System der tatsächlichen (planetarischen) Welt entspreche[9]. Dieser Anspruch aber hängt ohne ein physikalisches (dynamisches) Argument, wie es dann endgültig erst von Newton «nachgetragen» wurde, in der Luft. Er lässt sich nicht begründen. Damit besitzt das Kopernikanische System lediglich den Status einer *kinematischen Hypothese*. Diese ist darüber hinaus noch mit dem geozentrischen (kinematischen) System geometrisch äquivalent: Beide Systeme lassen sich durch Koordinatentransformation in bezug auf Sonne und Erde ineinander überführen – was schon Leibniz wusste[10].

Mit seinem Versuch, die planetarischen Bewegungen auf *Kreisbewegungen* mit *konstanter Winkelgeschwindigkeit* zurückzuführen, akzeptiert Kopernikus, so das zweite Argument, nicht nur das zentrale Stück der bisherigen Astronomie, er misst diese Astronomie sogar bewusst daran, inwieweit sie diesen beiden ältesten, in methodischer Strenge zum ersten Mal von Eudoxos benutzten astronomischen Prinzipien entsprach. Eben dies ist auch der Grund, warum

[8] Vgl. dazu J. Mittelstrass, Neuzeit und Aufklärung. Studien zur Entstehung der neuzeitlichen Wissenschaft und Philosophie, Berlin/New York 1970, 136–143.

[9] Belege bei J. Mittelstrass, a. a. O., 137 f.

[10] Tentamen de motuum coelestium causis [1689], in: G. W. Leibniz, Mathematische Schriften, I–VII, ed. C. I. Gerhardt, Berlin/Halle 1849–1863, VI, 146 Anm.

sich die Kopernikanische Kritik am sogenannten *Ausgleichspunkt* (punctum aequans) orientiert, dessen Annahme seit Ptolemaios dazu diente, die Gleichförmigkeit der vom Zentrum des Deferenten (wie auch von der Erde) aus betrachtet ungleichförmigen Planetenbewegung dadurch zu retten, dass man einen exzentrisch gelegenen Punkt, eben den Ausgleichspunkt, einführt, von dem aus betrachtet die Ungleichförmigkeit verschwindet. Die heliozentrische Hypothese ist daher in erster Linie nur ein Mittel, den alten Prinzipien der Kreisförmigkeit und der konstanten Winkelgeschwindigkeit der planetarischen Bewegungen wieder Geltung zu verschaffen. Dabei erklärt sie auf Anhieb die sogenannte zweite Ungleichheit dieser Bewegungen, d. h. ihre periodisch wiederkehrenden Unregelmässigkeiten, lässt aber die sogenannte erste Ungleichheit, die Ptolemaios zur Annahme des Ausgleichspunktes veranlasste, ungeklärt.

Die Kopernikanische «Revolution» fällt damit erstaunlich konservativ aus: Sie sucht die astronomischen Dinge zu verändern, indem sie an den (griechischen) Anfang der Astronomie, gemeint sind deren methodologische Prinzipien, zurückkehrt. Kein Wunder dann aber auch, dass die Kopernikus-Propaganda z. B. mit Giordano Bruno zunächst in ein falsches Fahrwasser gerät: Sie sieht in Kopernikus nicht etwa den Begründer einer neuen, sondern den Erneuerer einer alten «Philosophie»[11]. Das eigentliche humanistische Verständnis einer renaissancehaften Philosophie findet nicht zufällig in Kopernikus einen illustren Zeugen.

Sowohl der theoretische als auch der methodische Charakter der Kopernikanischen Astronomie machen also deutlich, dass sich, mit nüchternen wissenschaftshistorischen Augen betrachtet, die spätere geistesgeschichtliche Einordnung der Kopernikanischen «Revolution» einem Missverständnis – man könnte natürlich auch sagen: einem beachtlichen Mass an astronomischer und astronomiegeschichtlicher Unkenntnis – verdankt. Bewusstsein und Wirklichkeit gehen, wie so häufig, auseinander. Was Kopernikus behauptete, nämlich die Übereinstimmung seiner Hypothese mit der kosmologischen Ordnung der Welt, konnte er (mangels physikalischer Argumente) nicht beweisen, und was er (methodologisch) wollte, führt nicht in die neue Zeit, sondern in die Vergangenheit.

Die weitere astronomische Entwicklung bringt denn auch nicht nur Bestätigung der Kopernikanischen Hypothese (in den Arbeiten Keplers, Galileis und Newtons) mit sich, sondern auch Widerlegung: Keplers elliptische Bahnen, die nun auch die sogenannte erste Ungleichheit erklären, brechen mit beiden antiken Prinzipien, um deren Geltendmachung es Kopernikus vor allem ging. Erst jetzt, bei Kepler, wird die Astronomie wirklich eine andere. Von Keplers elliptischen ungleichförmigen Bahnbewegungen her gesehen, für die Kepler bereits selbst nach neuen dynamischen Erklärungen sucht, hat Kopernikus le-

[11] La cena de le ceneri I, in: Le opere italiane di Giordano Bruno, I–II, ed. P. de Lagarde, Göttingen 1888, I, 125.

diglich eine antike kinematische Hypothese (ohne geeignete dynamische Begründungen) systematisiert. Die Kopernikanische Wende ist in Wahrheit eine *Keplersche Wende*. Und von dieser Wende sei im folgenden die Rede[12].

2 Zur Vorgeschichte der «Keplerschen Wende»

Zunächst noch einmal zur Situation der vor-Keplerschen Astronomie (einschliesslich der Kopernikanischen). Die antike Astronomie war durch die beiden genannten Prinzipien der Kreisförmigkeit und der Gleichförmigkeit (der gleichförmigen Winkelgeschwindigkeit) bestimmt. Es sind aller Wahrscheinlichkeit nach Eudoxische, nicht (wie die Tradition behauptet) Platonische Prinzipien[13]. Alle Himmelskörper sollen sich auf Kreisen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit bewegen. Dem aber stehen schon in der Antike bekannte Ungleichheiten der Planetenbewegung entgegen. Der Erklärung dieser Ungleichheiten dient als erstes das homozentrische Modell des Eudoxos, das dann in astronomischer Hinsicht durch die *Exzentertheorie* des Hipparch und durch die *Epizykeltheorie* des Apollonios wesentlich verbessert wird. Nach der Exzentertheorie fällt der Mittelpunkt der Umlaufbahn der Sonne nicht mit dem Erdmittelpunkt zusammen; die Erde ist also exzentrisch gelagert. Nach der Epizykeltheorie bewegt sich jeder Planet gleichförmig auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt sich wiederum gleichförmig auf einem weiteren Kreis bewegt, in dessen Mittelpunkt die Erde liegt. Beide Modelle erweisen sich bereits in der Antike als empirisch äquivalent.

Durch die Aristotelische Kosmologie, zu deren physikalischen Elementen der Antrieb konzentrischer Planetenschalen von aussen nach innen und die Unterscheidung zwischen den Gesetzmässigkeiten einer sublunaren und einer supralunaren Welt gehören, erhält das Eudoxische System eine *physikalische* Erklärung. Exzenter- und Epizykeltheorien werden durch die Aristotelische Kosmologie nicht erfasst, weshalb in der weiteren Wissenschaftsentwicklung astronomische Modelle dieser Art lediglich den Status mathematischer Hypothesen (ohne physikalischen Bezug auf die Wirklichkeit) erhalten. Das griechische astronomische Forschungsprogramm einer *Rettung der Phänomene* arbeitet entsprechend mit kinematischen (kräftefreien) Modellen, nicht mit

[12] Die Keplersche Wende ist der astronomischen Sache nach näher dargelegt in meinem in Anm. 8 genannten Buch, ferner in: J. Mittelstrass, Die Rettung der Phänomene. Ursprung und Geschichte eines antiken Forschungsprinzips, Berlin 1960, 197 ff.; ders., Wissenschaftstheoretische Elemente der Keplerschen Astronomie, in: Internationales Kepler-Symposium. Weil der Stadt 1971. Referate und Diskussionen, ed. F. Krafft/K. Meyer/B. Sticker, Hildesheim 1973, 3–27 (engl. Methodological Elements in Keplerian Astronomy, Studies in History and Philosophy of Science 3 [1972], 203–232). – Die Darstellung der Abschnitte 2 bis 9 folgt in ihrem Aufbau und in wesentlichen Teilen der Darstellung der Keplerschen Astronomie und Wissenschaftstheorie in: M. Carrier/J. Mittelstrass, Johannes Kepler, in: Klassiker der Naturphilosophie. Von den Vorsokratikern bis zur Kopenhagener Schule, ed. G. Böhme, München 1989, 137–157, 407–410.

[13] Zu dieser Frage vgl. J. Mittelstrass, Die Rettung der Phänomene (vgl. Anm. 12), 140 ff.

Modellen einer physikalischen Kosmologie, und bildet insofern, wissenschaftstheoretisch gesprochen, ein *instrumentalistisches* Wissenschaftsverständnis aus.

Das gilt auch für das Ptolemaiische System, das die zeitgenössischen Exzenter- und Epizykeltheorien weiterentwickelt. Da Beobachtungen zur Annahme einer ungleichförmigen Bewegung des Epizykelmittelpunktes zwingen, arbeitet das Ptolemaiische System mit einem weiteren fiktiven Punkt, dem bereits erwähnten Ausgleichspunkt (punctum aequans), auf den bezogen die Planetenbewegung gleichförmig verläuft und der insofern die Planetenbewegung wieder «gleichförmig macht». Das Ptolemaiische System erlaubt damit, abgesehen von der Merkurbewegung (extreme Exzentrizität), eine exakte Beschreibung der Planetenbahnen und unterstellt physikalisch eine Aristotelische Kosmologie – obgleich diese strenggenommen den kinematischen Konstruktionen innerhalb des Ptolemaiischen Systems und dem ihnen zugrunde liegenden Instrumentalismus nicht entspricht. Die Tradition trägt diesem Umstand durch die Unterscheidung zwischen einer (instrumentalistischen) *mathematischen* Astronomie und einer (Aristotelischen) *physikalischen* Astronomie Rechnung. Dabei gelten im übrigen heliozentrische Hypothesen (Aristarch von Samos) geozentrischen Hypothesen insofern als unterlegen, als letztere näherungsweise auch dynamisch, nämlich durch die Aristotelische Physik ausgezeichnet sind.

Auch das Kopernikanische System vermag, wie schon hervorgehoben, keine dynamischen Gründe für eine heliozentrische Astronomie anzuführen. Es bewegt sich daher strenggenommen ebenfalls noch – entgegen dem Kopernikanischen Selbstverständnis und seiner geistesgeschichtlichen Rezeption – innerhalb des antiken Astronomieverständnisses (in dessen Rahmen der Auswahl des Mittelpunktkörpers, Erde oder Sonne, übrigens keine entscheidende Rolle zufiel). Kopernikus sucht zunächst die Exzenter- und Ausgleichsbewegung eines Planeten im (geozentrischen) Ptolemaiischen System durch zwei gleichförmig rotierende Epizykeln mathematisch wiederzugeben, ersetzt dann aber (De revolutionibus orbium coelestium, 1543) den ersten Epizykel und seinen konzentrischen Deferenten durch einen kinematisch äquivalenten exzentrischen Deferenten, womit die Sonne aus dem Mittelpunkt des Systems auf einen Exzenterpunkt rückt. Der Heliozentrismus des Kopernikanischen Systems ist die Folge einer einfacheren kinematischen Erklärung der Planetenanomalien (ohne zusätzliche Epizykeln). Physikalische Argumente fehlen. An ihrer Stelle steht das Kopernikanische Plädoyer für die Wiederbeachtung der alten Prinzipien der antiken Astronomie. Und mit eben diesen Prinzipien, einschliesslich des Instrumentalismusprinzips, bricht Kepler. Dieser Bruch stellt gleichzeitig die Voraussetzung dar, mit der ihm die vollständige Lösung des (astronomischen) Bewegungsproblems gelingt – wenn man von den Korrekturen durch Newtons und später Einsteins Gravitationstheorie absieht. Sie erfolgt durch drei Planetengesetze, die heute mit Keplers Namen verbunden sind.

3 Keplers Planetengesetze

Seine beiden ersten Gesetze entwickelt Kepler in der 1609 erschienenen «Astronomia Nova». Kepler sucht hier – gestützt auf Tycho Brahes Beobachtungen der Marsbewegung – eine Theorie der Marsbahn zu entwerfen, die möglichst genau mit dessen Aufzeichnungen übereinstimmt. Die wesentliche Voraussetzung für eine derartige Theorie bildet die Keplersche Frage, wie unter der Annahme der Kopernikanischen Hypothese die Planetenbewegung von der Sonne aus betrachtet erscheint. Im Kopernikanischen System fällt nämlich der Mittelpunkt der Planetenbahn nicht exakt mit der Sonne zusammen; von dieser aus betrachtet variieren sowohl Planetenabstand als auch Planetengeschwindigkeit. Bei der Analyse dieser Anomalien stösst Kepler auf den Umstand, dass für den sonnennächsten Punkt (Perihel) und den sonnenfernsten Punkt (Aphel) der Marsbahn die Bahngeschwindigkeit gerade umgekehrt proportional zur Entfernung von der Sonne ist. Er verallgemeinert diese Beobachtung und zieht aus ihr den Schluss, dass Bahngeschwindigkeit und Sonnenentfernung stets im umgekehrten Verhältnis zueinander stehen (Keplers *Radiengesetz*)[14].

Das weitere Problem besteht nun darin, die Position des Planeten unter der Voraussetzung dieses Radiengesetzes festzustellen. Aus mathematischen Gründen behilft sich Kepler mit einem Satz des Archimedes über Kreisflächen, der jedoch auf sein Problem nur näherungsweise anwendbar ist (es handelt sich daher auch in Keplers Augen um ein unvollkommenes Verfahren zur Berechnung der vom Radiengesetz bestimmten Bewegung[15]). Resultat ist die Feststellung, dass die Verbindungslinie von Sonne und Planet in *gleichen Zeiten gleiche Flächen* überstreicht. Dies ist der *Flächensatz* oder das (heute sogenannte) *zweite Keplersche Gesetz.* Allerdings besitzt dieses Gesetz zunächst nur den Status einer aus rechentechnischen Gründen gewählten Näherung. Weitere Kontrollrechnungen machen deutlich, dass die Marsbahn kein Kreis sein kann. Die *Ellipse* erweist sich schliesslich als die korrekte Form der Marsbahn[16]. Demnach bewegen sich die Planeten auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Das ist das *erste Keplersche Gesetz.*

Eine Schwierigkeit beruht nun darin, dass der Flächensatz ursprünglich für den exzentrischen Kreis (und nicht für die Ellipse) hergeleitet wurde. Kepler glaubt, dass bei der Ellipse Flächensatz und Radiengesetz *exakt* (und nicht bloss näherungsweise) *äquivalent* sind, was ihm «wie ein Wunder»[17] erscheint. Hier waltet allerdings kein Wunder, sondern der Irrtum. Kepler verwechselt nämlich Bahngeschwindigkeit und Azimutalgeschwindigkeit (Geschwindigkeit senkrecht zur Verbindungslinie von Sonne und Planet). Das

[14] Astronomia Nova, in: J. Kepler, Gesammelte Werke, I–XXII, ed. W. v. Dyck/M. Caspar/F. Hammer, München 1937ff. (im folgenden zitiert als KGW), III, 235–236.

[15] KGW III, 263.

[16] KGW III, 366–367.

[17] KGW III, 268.

Radiengesetz bezogen auf die Azimutalgeschwindigkeit ist tatsächlich äquivalent zum Flächensatz. Doch ist diese Geschwindigkeit dann eben nicht mehr die Geschwindigkeit des Planeten insgesamt, sondern nur eine Komponente dieser Geschwindigkeit[18]. Im fünften Buch der «Epitome Astronomiae Copernicanae» (1621) führt Kepler eine entsprechende Komponentenzerlegung durch und formuliert das Radiengesetz nur noch für die Azimutalgeschwindigkeiten[19]. Erst hier werden die Flächen zu Recht das Mass der Zeit[20], und erst hier verliert der Flächensatz den Status eines hilfsweisen Rechenverfahrens. Er wird zu einem wirklichen Gesetz.

Keplers *drittes Gesetz* bezieht sich dann nicht auf die Bewegungsformen einzelner Planeten, sondern auf einen Vergleich der Bewegungen verschiedener Planeten. Es stellt damit einen völlig neuartigen Typus astronomischer Regelmässigkeiten dar. Die Formulierung dieses Gesetzes erfolgt dabei eher beiläufig: «Es ist ganz sicher und stimmt vollkommen, dass die Proportion, die zwischen den Umlaufszeiten irgend zweier Planeten besteht, genau das Anderthalbe der Proportionen der mittleren Abstände, d. h. der Bahnen selber, ist[21].» Heute wird dieses Gesetz in der Form ausgedrückt, dass die Kuben der grossen Halbachsen der Bahnellipsen a proportional zu den Quadraten der Umlaufzeiten T sind (a^3/T^2 = const.).

4 Dynamik I: Fall und Wurf

Mit den Keplerschen Gesetzen ist die *Kinematik* der Planetenbewegung vollständig und fundamental anders als bei Kopernikus formuliert. Doch damit nicht genug. Kepler bleibt bei dieser – methodisch gesehen noch immer traditionellen – Astronomieform nicht stehen, sondern sucht nach einer *dynamischen* Erklärung seiner Gesetze. Nicht nur die Kopernikanische Kinematik, auch die Einzelheiten der Aristotelischen Dynamik (wenn auch nicht deren Grundkonzeptionen) erweisen sich als nicht mehr tragfähig. Gemeint ist das Folgende:

Die (Kopernikanische) Annahme einer bewegten Erde birgt im Rahmen einer Aristotelischen Physik erhebliche Schwierigkeiten bei der Analyse von Fall- und Wurfbewegungen. Die natürliche Fallbewegung verbindet zwei Punkte im Kosmos miteinander. Wenn sich während des Falls die Erde bewegte, würde ihr der Körper nicht folgen, sondern weiterhin entlang jener festen Linie im Raum fallen. Ein senkrecht nach oben geworfener Stein könnte nicht an seinen Ausgangspunkt zurückkehren. Tatsächlich tritt jedoch gerade dies ein. Eine Bewegung der Erde erscheint aus physikalischen Gründen aus-

[18] Vgl. E. J. Aiton, Infinitesimals and the Area Law, in: F. Krafft/K. Meyer/B. Sticker (eds.), Internationales Kepler-Symposium. Weil der Stadt 1971, Hildesheim 1973, 304.

[19] KGW VII, 377.

[20] KGW VII, 378.

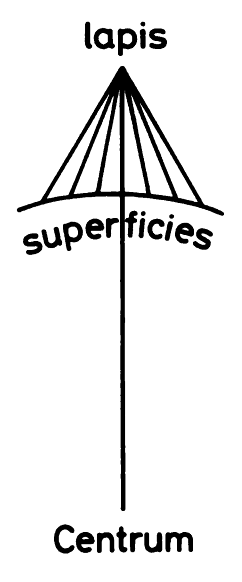
[21] KGW VI, 302.

geschlossen. Um diesem Argument zu begegnen, vertritt Kopernikus eine (bereits von Plutarch erwähnte, aber verworfene) «Ganzheitstheorie» der Schwere. Nach dieser Theorie ist die Schwere eine natürliche Tendenz natürlich gleicher Teile zur Einheit und Ganzheit. Der Stein fällt zur Erde, weil er von gleicher Natur wie die Erde ist. Wegen dieser Gleichheit der Naturen bewegen sich auch fallende Körper mit der ihrerseits bewegten Erde mit.

Diese Vorstellung zeigt deutlich das Fehlen des modernen Trägheitsbegriffs. Im Rahmen der spätmittelalterlichen Impetusphysik (die ihrerseits eine Weiterentwicklung der Aristotelischen Physik ist) stellt allein die Ruhe einen natürlichen Zustand dar; Bewegung benötigt einen Antrieb. Theoretischer Ausdruck dieser Konzeption ist die (üblicherweise als Aristotelisch bezeichnete, tatsächlich eher impetusphysikalische) Bewegungsgleichung: die Kraft F ist gleich dem Produkt aus Masse m und Geschwindigkeit v ($F = mv$). Kepler schliesst sich dieser Konzeption an. Auch für ihn stehen Ruhe und (geradlinig-gleichförmige) Bewegung nicht auf demselben ontologischen Niveau; vielmehr strebt jeder Körper von Natur aus zur Ruhe: «Jeder materielle Körper ist sich selbst und seiner Natur nach zur Ruhe bestimmt, an welchen Ort er auch versetzt wird. Denn Ruhe ist wie Finsternis ein Mangel, der keiner Erschaffung bedarf, sondern dem Erschaffenen anhaftet wie ein Nichts. Bewegung ist dagegen etwas Positives wie das Licht. Wenn demnach ein Stein von seinem Ort bewegt wird, so geschieht dies nicht insofern er materiell ist, sondern insofern er einen äusseren Stoss oder eine Anziehung erleidet oder in sich eine Fähigkeit besitzt, die sich irgendwohin orientiert[22].» Entscheidend ist dabei, dass der Körper dazu neigt, an *jedem* Ort zu ruhen[23]. In Keplers Vorstellung fehlt der Begriff des ausgezeichneten («natürlichen») Ortes der Aristotelischen Physik, auf den hin die Körper eine «natürliche» Bewegung ausführen. Ein Punkt kann Schweres nicht bewegen[24]. Damit wird aber jeder Ort zu einem natürlichen Ort, d. h., es zeichnet sich die neuzeitliche Vorstellung der *Homogenität* des Raumes ab.

Um das Problem von Fall und Wurf in diesem begrifflichen Rahmen zu lösen, greift Kepler auf Gilberts Auffassung der Schwere als magnetischer Attraktionskraft zurück, die dieser zur (nicht-Aristotelischen) physikalischen Erklärung der raumfesten Orientierung der Erdachse und der täglichen Erdrotation entwickelt hatte (De magnete, 1600). Kepler wörtlich: «Die schwäre ist nichts anderes dan der Magnetische Zug der Erden[25].» Allerdings wird bei Kepler (im Gegensatz zu Gilberts Anwendung der Konzeption einer Attraktionskraft auf alle Himmelskörper) die Wirkung der Schwere auf verwandte Körper beschränkt, worin man ein Nachwirken der Kopernikanischen Ganz-

[22] Brief vom 26. 1. 1605 an Fabricius, KGW XV, 241.
[23] Vgl. Astronomia Nova, KGW III, 25.
[24] Ebd.
[25] Einwände gegen Aristoteles, in: N. Kopernikus, Erster Entwurf seines Weltsystems sowie eine Auseinandersetzung mit Aristoteles über die Bewegung der Erde, ed. F. Rossmann, Darmstadt 1986 (München 1948), 89.



heitstheorie sehen kann. Jedenfalls ist die Schwere eine *äussere* Kraft und keine innere Tendenz. Alle verwandten Körper – wie Erde und Stein, aber auch Erde und Mond – ziehen sich mit einer Kraft körperlichen Ursprungs an, die proportional zu den Gewichten oder Massen der beteiligten Körper und *wechselseitig gleich* ist. Wie die Erde den Mond, so zieht der Mond die Erde an, wobei sich die Wirkung der lunaren Attraktion auf die Erde durch die Gezeiten dokumentiert[26]. Kepler entwickelt damit als erster eine im Grundsatz korrekte Vorstellung der Ursachen von Ebbe und Flut.

Auch mit dieser neuartigen Theorie der Schwere ist allerdings das Problem des Falls noch nicht gelöst. Dessen Lösung sucht Kepler in der besonderen Struktur der attraktiven Kraft. Dazu stellt er sich vor, dass von einem über dem Erdboden befindlichen Körper unsichtbare elastische Bänder oder magnetische Ketten zur Erde reichen (wobei Kepler die Schwere mit der Magnetkraft zwar in der Regel identifiziert, gelegentlich aber auch nur analogisiert). Diese Bänder haben insgesamt eine *kegelförmige* Struktur, verbinden also den Körper nicht allein mit den senkrecht unter ihm befindlichen, sondern auch mit benachbarten Bereichen (Bild 1[27]).

Dabei heben sich allerdings die seitwärts gerichteten Kräfte insgesamt auf, so dass die resultierende Kraft senkrecht nach unten weist. Fehlte die Schwere, würde etwa ein in die Höhe geworfener Stein durch seine natürliche Neigung zur Ruhe abgebremst, während die Erde sich unter ihm weiterbewegte. Durch die kegelförmige Anordnung der elastischen Schwerebänder wird dieses Zurückbleiben verhindert; die aufgrund der Rotation der Erde einseitig gespannten magnetischen Ketten ziehen den geworfenen Stein seitwärts mit der Erde mit. Es findet demnach eine Art Konkurrenz zwischen der Widerstandskraft des Körpers und der Anziehungskraft der Erde statt. Der senkrecht geworfene Stein kehrt deshalb an seinen Ausgangspunkt zurück, weil die Anziehungskraft die Widerstandskraft bei weitem überwiegt. Zwar bleibt strenggenommen der Stein hinter der Erdbewegung zurück, aber diese Abweichung ist unmerklich. Entfernt sich ein Körper hingegen sehr weit von der Erde, so nimmt deren Anziehungskraft ab; der Zug der Erde kann das Zurückbleiben des Körpers nicht völlig verhindern[28].

Keplers Theorie des freien Falls beruht in einer neuartigen (sich gleichwohl von der modernen Konzeption wesentlich unterscheidenden) Auffas-

[26] KGW XV, 241.
[27] Vgl. KGW XV, 241.
[28] Astronomia Nova, KGW III, 27–28.

sung der Schwerkraft, nicht der Bewegung. Kepler kennt das Trägheitsprinzip, wie es sich dann bei Descartes und Galilei formuliert findet, nicht, sondern nimmt (mit der Impetusphysik) einen natürlichen Widerstand gegen Bewegung jeglicher Art an. Ein weiterer Unterschied zur modernen (auf Newton zurückgehenden) Konzeption ist, dass die so verstandene Schwerkraft zur Bewegung der Himmelskörper fast nichts beiträgt. Trotzdem bedeuten die Analysen Keplers einen wesentlichen Fortschritt gegenüber der Kopernikanischen Konzeption auch in dynamischen Dingen.

5 Dynamik II: Die Begründung der Planetengesetze

Die physikalische Ursache der Planetenbewegungen sucht Kepler in einer besonderen bewegenden Kraft («vis motrix»), die ihren Sitz in der Sonne hat. Innerhalb der Impetustheorie verweist jede Bewegung auf die andauernde Wirkung einer Kraft in der Richtung der Bewegung. Dementsprechend muss die die Planeten bewegende Kraft stets *azimutal,* also senkrecht zur Verbindungslinie von Sonne und Planet, gerichtet sein. Kepler denkt sich eine «immaterielle Spezies» (species immateriata), die, dem Lichte verwandt, von der Sonne ausgeht und sich in den Raum des Planetensystems ergiesst. Die Kraftstrahlen selbst sind also radial gerichtet; um die Planeten in eine Bewegung um die Sonne zu versetzen, müssen sie rotieren. Die rotierenden Kraftstrahlen reissen den Planeten mit und bringen auf diese Weise die Umlaufbewegung hervor[29]. Gleichzeitig führt diese Erklärung auf die Vermutung, dass die Rotation der Kraftstrahlen ihrerseits auf die Rotation der Sonne zurückgeht. Tatsächlich prognostiziert Kepler 1609 die (damals noch unbekannte) Sonnenrotation[30]. Diese wird einige Jahre später wirklich nachgewiesen; mit berechtigtem Stolz verweist Kepler auf seine erfolgreiche Prognose[31].

Wenn nun die Planetenbewegung allein durch die Antriebskraft der Sonne verursacht würde, müssten alle Planeten in der gleichen Zeit einen Umlauf vollenden. Tatsächlich bleiben die Planeten wegen ihres Bewegungswiderstands hinter den rotierenden Kraftstrahlen zurück. Es tritt genau der im Zusammenhang mit der Schwere diskutierte Fall ein, dass die Antriebskraft nicht stark genug ist, um den Widerstand völlig zu überwinden; die Planeten entziehen sich teilweise dem Zug der Sonne[32]. Das wiederum hat zur Folge (wie Kepler 1609 voraussagt), dass die Rotationsdauer der Sonne erheblich weniger als 88 Tage (d.i. die Umlaufzeit des Merkur, also des innersten und damit schnellsten Planeten) betragen muss. In der Tat kann Kepler 1620 feststellen, dass dies zutrifft.

[29] Astronomia Nova, KGW III, 239–244.
[30] Astronomia Nova, KGW III, 243.
[31] Epitome, KGW VII, 290, 298.
[32] Vgl. Epitome, KGW VII, 301.

Kepler nimmt an, dass die Stärke der azimutalen Antriebskraft umgekehrt proportional zur Sonnenentfernung abnimmt, dass also gilt: $F\alpha = c/r$ (mit $c =$ const.). Den Grund dieser Annahme bildet die Analogie zum Hebelgesetz, in dem ebenfalls Kraft und Kraftarm in umgekehrtem Verhältnis stehen. Dabei vermutet Kepler zunächst, dass auch die Lichtstärke eine Entfernungsabhängigkeit dieser Art aufweist, stellt dann jedoch fest, dass sich jene mit dem Quadrat des Abstands von der Lichtquelle vermindert. Um trotzdem das lineare Abstandsgesetz für die Azimutalkraft plausibel zu machen, nimmt er an, dass die vis motrix immer kreisförmig um die Sonne orientiert ist; ihre Wirkung bemisst sich allein nach ihrer Stärke auf diesem Kreis in Richtung der Planetenbewegung. Dabei schwächen sich sowohl die immaterielle Spezies als auch das von der Sonne ausgehende Licht in Längsrichtung (also entlang des planetarischen Kreises) und senkrecht dazu ab (also in Richtung des Pols der Ekliptik), und zwar jeweils umgekehrt proportional zum Abstand von der Quelle, da der Umfang eines Kreises proportional zum Radius wächst und die Quantität insgesamt erhalten bleibt[33]. Für das Licht führt dies zu einem quadratischen, für die Kraft zu einem linearen Abstandsgesetz, da hier nur die Komponente in Längsrichtung wichtig ist[34]. Aus dem physikalisch plausiblen Abstandsgesetz für die vis motrix ergibt sich der Flächensatz unmittelbar. Damit ist das zweite Keplersche Gesetz physikalisch begründet.

Auf die Keplerschen Begründungen des ersten und des dritten Gesetzes soll hier, um zu viele Details zu vermeiden, nicht näher eingegangen werden. Nur soviel: Zur Begründung des ersten Gesetzes führt Kepler eine weitere Attraktionskraft ein. Denn: Wirkte allein die vis motrix auf die Planeten, so wären deren Bahnen kreisförmig und nicht ellipsenförmig. Diese weitere Kraft wirkt *radial*, also in Richtung der Verbindungslinie von Sonne und Planet, und steht damit senkrecht auf der vis motrix. Die Begründung des dritten Gesetzes macht dann unter anderem von einer geringfügigen Modifikation der Bewegungsgleichung Gebrauch, die dem Umstand Rechnung trägt, dass die Planeten unterschiedliche Volumina und Massen aufweisen, sowie von der (physikalisch nicht weiter begründeten) Annahme, dass die Massen der Planeten proportional zu den Wurzeln der Bahnradien wachsen.

6 Mechanismus und Animismus

Keplers naturphilosophisches Denken ist insgesamt durch den Übergang von einem animistischen zu einem stärker mechanistisch geprägten Standpunkt gekennzeichnet. So spricht Kepler anfangs von einer bewegenden Seele (anima motrix) statt von einer bewegenden Kraft (vis motrix). In einer späteren Anmerkung (zur zweiten Auflage des «Mysterium Cosmographicum»)

[33] Vgl. Astronomia Nova, KGW III, 240.
[34] Epitome, KGW VII, 305.

wird diese ältere Terminologie ausdrücklich verworfen: «Wenn man statt des Wortes ‹Seele› das Wort ‹Kraft› setzt, hat man gerade das Prinzip, auf dem die Himmelsphysik in den Marskommentaren [d.i. die ‹Astronomia Nova›] grundgelegt und in der Epitome [Band] IV vervollkommnet worden ist. Dereinst war ich nämlich des festen Glaubens, dass die die Planeten bewegende Ursache eine Seele sei, erfüllt von den Lehren des J. C. Scaliger über die bewegenden Seelenkräfte. Als ich aber darüber nachdachte, dass diese bewegende Ursache mit der Entfernung nachlässt, genau wie auch das Licht der Sonne mit der Entfernung von der Sonne schwächer wird, zog ich den Schluss, diese Kraft sei etwas Körperliches, freilich nicht im eigentlichen Sinn, sondern nur der Bezeichnung nach, wie wir auch sagen, das Licht sei etwas Körperliches, und damit eine von dem Körper ausgehende, jedoch immaterielle Spezies meinen[35].»

Dieser wissenschaftshistorisch wichtige Übergang vom Begriff der «anima» zum Begriff der «vis» ist mit einer eigentümlichen, widersprüchlich erscheinenden Kennzeichnung verknüpft. So wird diese Kraft sowohl als körperlich als auch als immateriell bezeichnet. «Körperlichkeit» bedeutet jedoch an dieser Stelle, dass die entsprechende Grösse *mathematischen Bestimmungen* unterworfen werden kann. Die gesetzmässige Entfernungsabhängigkeit der vis motrix zeigt deren Körperlichkeit an[36]. Damit bedeutet Keplers terminologischer Übergang von «seelischen» zu «körperlichen» Vermögen eine wesentliche *Methodisierung* der physikalischen Begrifflichkeit. Dies wird auch in der von Kepler programmatisch formulierten Idee einer kosmischen Maschinerie deutlich: «Meine Absicht ist es zu zeigen, dass die himmlische Maschine keine Art göttliches Lebewesen, sondern eine Art Uhrwerk ist (...), insofern die ganze Vielfalt der Bewegungen von einer einzigen, ganz einfachen körperlichen magnetischen Kraft ebenso abhängt wie alle Bewegungen einer Uhr von einem sehr einfachen Gewicht. Auch zeige ich, dass dieser physikalische Grund auf numerische und geometrische Weise bestimmt werden kann[37].»

Keplers programmatische Verwendung der Uhrwerk-Metapher scheint eine Verwandtschaft seiner Vorstellungen mit der mechanischen Naturauffassung des späteren 17. Jahrhunderts nahezulegen. Doch dies ist tatsächlich in nur sehr eingeschränkter Weise der Fall. Keplers Naturphilosophie ist nicht mit der Naturphilosophie Boyles, die diesen Mechanismus am deutlichsten zum Ausdruck bringt, identisch. Für Kepler beruhen nicht alle Wechselwirkungen auf Druck und Stoss von Teilchen; auch seelische Vermögen haben durchaus ihren Platz in der physischen Welt. So ist zwar die Umlaufbewegung der Planeten auf natürliche (also gleichsam mechanische) Ursachen zurückführbar, doch geht die Rotation der Sonne und der Planeten um ihre eigene

[35] Mysterium Cosmographicum, KGW VIII, 113 (dt. Mysterium Cosmographicum. Das Weltgeheimnis, übers. u. eingel. v. M. Caspar, Augsburg 1923, 129).
[36] Epitome, KGW VII, 302.
[37] Brief vom 10. 12. 1605 an Herwart von Hohenburg, KGW XV, 146.

Achse (und damit der gesamte Antrieb der kosmischen Maschinerie) auf die Wirkung bewegender Seelen zurück[38]. Dass insbesondere die Sonne eine Seele besitzt, erweist sich für Kepler auch darin, dass die Sonne Quelle des Lichts ist, das seinerseits eine innere Verwandtschaft mit der Seele aufweist[39].

Um Keplers Philosophie der Natur richtig zu verstehen, hat man im übrigen zu berücksichtigen, dass die Renaissance-Philosophie nicht nur zwischen Körper und Geist unterscheidet, sondern zwischen Körper, Geist und Seele. Seelische Vermögen sind instinkthaft, geistige Fähigkeiten hingegen durch Vernunft und Intelligenz gekennzeichnet. Keplers primäres philosophisches Interesse ist die Austreibung des *Geistes,* nicht der *Seele* aus der Natur. So wendet er sich gegen Tycho Brahes astronomisches System mit dem Argument, dass in ihm die Himmelskörper mehrere komplizierte Bewegungen gleichzeitig ausführen müssten. Dies aber setze notwendig das Wirken geistiger, intelligenter Kräfte voraus, wogegen seine eigene Theorie im wesentlichen mit magnetischen Kräften auskomme; nur für die tägliche Rotation müssten seelische Vermögen angenommen werden[40]. In erster Linie geht es Kepler also um die Befreiung der Natur *und* der Seele vom Geist, erst in zweiter Linie um ein allmähliches Zurückdrängen seelischer Momente. Zwar funktioniert die Welt wie ein Uhrwerk, aber der Ursprung seines Ganges ist nach Kepler noch immer in den Kräften der Seele zu suchen.

7 Der Keplersche Fortschritt

Damit noch einmal zurück zu den Ausgangsüberlegungen über die Konkurrenz von Kopernikanischer und Keplerscher Wende. Keplers Planetentheorie ist (1) eine technische und an Details orientierte Verbesserung der Kopernikanischen Leistung – zum ersten Mal kann der Anspruch einer Rettung der Phänomene wirklich eingelöst werden. Sie markiert (2) einen fundamentalen Wechsel innerhalb der Prinzipien der mathematischen Astronomie; die beiden bisherigen Prinzipien oder Axiome der antiken Astronomie (Kreisförmigkeit und gleichförmige Winkelgeschwindigkeit) werden preisgegeben. Keplers ungleichförmig durchlaufene Ellipsenbahnen sind daher auch astronomiegeschichtlich gesehen etwas unerhört Neues. Mit ihnen – nicht mit dem Kopernikanischen Modell, das konzeptionell noch der antiken Astronomie verbunden bleibt – beginnt die Astronomie im neuzeitlichen, modernen Sinne. Die Kopernikanische Wende ist, noch einmal, in Wahrheit eine *Keplersche Wende.*

Ein neuartiger Aspekt des Keplerschen Denkens liegt ferner (3) in der Entwicklung einer *Himmelsphysik.* Keplers Ziel ist die physikalische Begründung

[38] Epitome, KGW VII, 298, 316; Harmonice Mundi, KGW VI, 269.
[39] Epitome, KGW VII, 298–299.
[40] Ebd.

:r Kopernikanischen Astronomie. Im Zuge dieser Begründung hebt er die veitausendjährige Trennung zwischen mathematischer Astronomie und phy-kalischer Astronomie bzw. Kosmologie, zwischen irdischer Physik und den :sonderen Gesetzen der himmlischen Bewegungen auf. Für Kepler hat die stronomie nunmehr zwei Ziele: die Phänomene zu «retten» *und* über den ufbau des Kosmos nachzudenken; die Entwicklung einer Himmelsphysik ird zur wesentlichen Aufgabe des Astronomen[41]. Das bedeutet auch, dass es ır Anerkennung einer astronomischen Theorie nicht mehr genügt, dass diese .e Beobachtungsdaten akkurat wiedergibt. Darüber hinaus muss sie «aus :n natürlichen Prinzipien der Bewegung abgeleitet sein»[42].

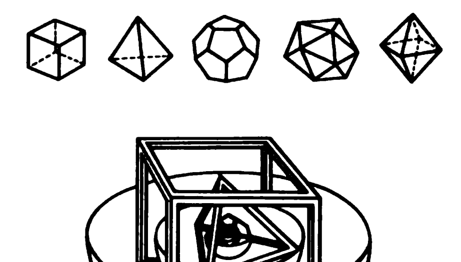
Es ist eben dieser Anspruch, dem Kepler durch seine physikalische Be-ündung der drei Planetengesetze gerecht zu werden sucht. Anders als die nnahmen der älteren astronomischen Forschung sind Keplers Gesetze *Na-rgesetze.* Und dies bedeutet (4) auch die Verwerfung des dritten Prinzips der ıtiken Astronomie, nämlich die Absage an eine instrumentalistische Deu-ng einer Theorie der Himmelsbewegungen. Auch im Blick auf diese Kepler-he Idee einer Physik des Himmels ist es richtig, von einer Keplerschen 'ende zu sprechen.

Mit anderen Worten: Eine Kopernikanische Wende fand im wesentlichen cht in der Astronomie, sondern in den Köpfen der Geisteswissenschaftler att; sie ist, in ihrem *wissenschaftshistorischen* Gehalt, eine Erfindung der eistesgeschichte. Sie ist deshalb nicht ohne Einfluss auch auf die Wissen-:haftsgeschichte geblieben. Im Gegenteil. Mit Galileis *physikalischem* Pro-·amm und Kants *erkenntnistheoretischem* Programm hat sie selbst jene Kon-·etheit gefunden, die die Wirklichkeit zu verändern vermag. Im Selbstver-ändnis und im Situationsverständnis der Neuzeit tritt der Kopernikaner an ie Stelle des Ptolemäers. Man sieht – mit kopernikanischen Augen – die Welt nders, nicht nur die astronomische Welt. Und doch darf dieser Umstand icht dazu führen, nun auch die wissenschaftshistorischen Gewichte umzu-ängen. Der Name Kopernikus steht in Wahrheit für eine *Keplersche Welt.*

Die Harmonien des Kosmos

:u dieser Keplerschen Welt gehören allerdings nicht nur eine neue, in neuen ıethodischen Prinzipien begründete Astronomie und eine neuartige Him-ıelsphysik, sondern auch Elemente, die uns weit archaischer erscheinen als ler Kopernikanische Konservativismus in methodischen Dingen. Gemeint ind die Keplerschen *Harmonievorstellungen.* Während uns Kepler in seinen onzeptionellen und wissenschaftlichen Leistungen fast wie ein Zeitgenosse rscheint, ist es der Kepler des «Mysterium Cosmographicum» und der Weltharmonik», der uns in ein fernes mythisches Reich zu ziehen scheint.

[41] Epitome, KGW VII, 257.
[42] Epitome, KGW VII, 381.



Für diesen Kepler gleicht das kosmische Szenario weniger einem Uhrwerk als einem pythagoreischen Himmel und einem sechsstimmigen Chor.

So sucht Kepler im «Mysterium Cosmographicum» bekanntlich die Grösse der Planetenbahnen und die Anzahl der Planeten durch Rückgriff auf die fünf regulären Polyeder, die sogenannten Platonischen Körper (nämlich Tetraeder, Würfel, Oktaeder, Dodekaeder, Ikosaeder), zu erklären. Bei jedem dieser Körper stehen die umbeschriebene und die einbeschriebene Kugel in einem festen Grössenverhältnis zueinander, das Kepler in den Proportionen der Radien der Planetenbahnen zu erkennen glaubt. Die um- bzw. einbeschriebenen Kugeln stellen jeweils Planetensphären dar, zwischen denen sich das zugehörige Polyeder erstreckt (Bild 2).

Zur Erläuterung: Im Sonnensystem ist der Entfernungsunterschied zwischen der Mars- und der Jupiterbahn maximal. Also muss hier dasjenige Polyeder eingefügt werden, bei dem der Unterschied zwischen der um- und der einbeschriebenen Kugel am grössten ist, und das ist das Tetraeder[43]. In gleicher Weise reiht Kepler die anderen Platonischen Körper in die restlichen Zwischenräume ein und erreicht eine befriedigende Übereinstimmung mit den verfügbaren Beobachtungsdaten. Geometrische Proportionen erklären die Zahl der Planeten und die Ausdehnung der Bahnen: «Was bleibt uns übrig, als mit Plato zu sagen, Gott treibe immer Geometrie, und er habe bei dem Bau der Wandelsterne Körper den Kreisen und Kreise den Körpern so lange einbeschrieben, bis kein Körper mehr da war, der nicht innerhalb und ausserhalb mit beweglichen Kreisen ausgestattet war[44].» In der Struktur des Kosmos spiegelt sich der Schöpfungsplan eines Geometrie treibenden Gottes.

Die göttliche Vernunft bestimmt dabei das kosmische System *vollständig*. Alles ist bis ins Detail geordnet; nirgends bleibt Raum für Willkür und Beliebigkeit. Auch die Abfolge der Polyeder entspringt vernünftigen Gründen, ist also nicht nachträglich den planetarischen Bewegungen angepasst. So muss z. B. auf den Würfel das Tetraeder folgen, weil das Tetraeder durch Beschneiden des Würfels entsteht[45]. Das System der Polyeder schafft einen Vernunftgrund für die Theorie des Kopernikus, die dieser sich aus den Erscheinungen zurechtlegte; es liefert «Gründe, die a priori aus den Ursachen, aus der Idee der Schöpfung hergeleitet sind»[46]. In gleicher Weise verweist die Anordnung

[43] Mysterium Cosmographicum, KGW VIII, 46–48.
[44] Mysterium Cosmographicum, KGW VIII, 47 (dt. 48).
[45] Harmonice Mundi, KGW VI, 291.
[46] Mysterium Cosmographicum, KGW VIII, 47.

er kosmischen Hauptteile auf die christliche Dreieinigkeit. Im Zentrum des 'niversums ist der Sitz der Sonne, die Gottvater entspricht. Die Sternen- ›häre stellt Gottsohn dar. Im Bereich der Planeten, zwischen Zentrum und ternensphäre, ist der Ort des Heiligen Geistes[47]. Theologische Momente ver- inden sich mit kosmologischen Argumenten.

Dass das Universum ein planvoll geordnetes und nach Prinzipien struktu- ertes Ganzes darstellt, ist auch an anderen Eigenschaften erkennbar. Der .osmos wird nämlich durch zwei Kugeln (die Sonne und die Sternensphäre) egrenzt; das Gekrümmte ist gottähnlich. Hingegen werden die Planetenbah- en durch Polyeder ausgedrückt, da die gerade Linie das Geschaffene dar- ellt. Die Platonischen Körper suchen die Kugel, das Bild Gottes, so weit achzubilden, wie dies aus Geraden bestehenden Figuren möglich ist[48]. Aus- ruck der kosmischen Ordnung ist ferner die fehlende Rotation des Mondes. benso wie die Rotation der Sonne die Planeten herumtreibt, ist die Rotation er Planeten für den Umlauf der Monde verantwortlich. Da der Erdmond ›er selbst keinen Mond hat, wäre seine Rotation überflüssig und diente kei- em Zweck. Folglich kehrt er der Erde stets dieselbe Seite zu[49].

In der «Harmonice Mundi» (1619) ergänzt Kepler sein Polyeder-Modell es Kosmos, das ohnehin nicht mehr zu einer Astronomie passt, die Ellipsen- ahnen und damit variable Sonnenentfernungen vorsieht, um weitere neuar- ge Elemente. Er stützt sich dabei auf die Pythagoreische Entdeckung, dass ch die Klangverhältnisse von Tönen durch die Längenverhältnisse schwin- ender Saiten ausdrücken lassen. Hier sind für Kepler *sieben Grundharmonien* ınd damit die entsprechenden Saitenverhältnisse) in besonderer Weise aus- ezeichnet, nämlich die Oktave (mit dem Verhältnis 1/2), die Quint (2/3), die)uart (3/4), die grosse Terz (4/5), die kleine Terz (5/6), die kleine Sext (5/8) ınd die grosse Sext (3/5). Die Auszeichnung gerade dieser Verhältnisse sucht (epler durch besondere Konstruktionen der Kreisteilung auch *geometrisch* zu echtfertigen. Sein Ziel ist, diese harmonischen Proportionen auch in den Be- vegungen der Himmelskörper aufzuzeigen, also die kosmologische Bedeu- ung der sieben Grundharmonien nachzuweisen. Das Urteil des Gehörs ahmt len Schöpfer nach[50].

Details seien hier nicht mehr näher ausgeführt, nur einige Elemente ge- ıannt: Den einzelnen Planeten werden nicht nur Tonverhältnisse, sondern ıuch Töne zugeschrieben. Die Tonhöhen variieren. Nur zu besonders ausge- eichneten Zeitpunkten klingen zwei (oder mehrere) Planeten tatsächlich zu- ammen. Die Himmelsmusik stellt ein stetes Wechselspiel von Konsonanz ınd Dissonanz dar. Dabei markiert der Zusammenklang mehrerer Planeten eweils besonders herausgehobene Zeitpunkte. Das gilt in besonderem Masse, venn tatsächlich einmal alle sechs Planeten einen harmonischen Einklang bil-

[47] Epitome, KGW VII, 258.
[48] Epitome, KGW VII, 267, 272.
[49] Epitome, KGW VII, 319.
[50] Harmonice Mundi, KGW VI, 93.

den. Zu vermuten ist, dass eine derartige Konstellation nur ein einziges Mal realisiert war; sie bezeichnet nach Kepler den Zeitpunkt der Erschaffung der Welt (und damit den Anfang der Zeit)[51].

Das System der Harmonien ergänzt die Konstruktion der regulären Polyeder. Diese erklärt die Zahl der Planeten und näherungsweise deren Sonnenabstände, jenes liefert gleichsam die Feinabstimmung und trägt den Umlaufzeiten der Planeten und den Exzentrizitäten ihrer Bahnen Rechnung. Beide Ordnungsprinzipien sind nicht völlig miteinander verträglich. So hat die Form des harmonischen Zusammenklangs Vorrang vor der Materie der körperlichen Figuren und führt zu kleineren Abweichungen von den Platonischen Körpern[52].

9 Die Einheit von Naturphilosophie und Naturerklärung

Zwischen dem Kepler der Himmelsphysik, der wie ein Zeitgenosse argumentiert, und dem Kepler der Weltharmonik, der wie aus einer anderen Welt zu uns spricht, scheint eine merkwürdige Diskrepanz zu bestehen. Diese Diskrepanz ist allerdings nur für uns wahrnehmbar. Für Kepler selbst bestand sie nicht, was unter anderem durch die Selbstverständlichkeit zum Ausdruck kommt, mit der er zwischen beiden Argumentationsweisen wechselt: Dass die Länge des Erdjahres gerade 365,25 Tage beträgt, lässt erkennen, dass die Rotation der Erde nicht allein auf die Tätigkeit der Erdseele zurückgeht. Diese hätte nämlich auf eine Jahreslänge mit der archetypischen Zahl von 360 Tagen geführt. Die verbleibenden 5,25 Tage gehen auf eine Beschleunigung der Erdrotation durch die Einwirkung der Sonne zurück. Äussere Kräfte und innewohnende Seelen verbinden sich in einem Argument.

Himmelsphysik und Weltharmonik sind auch durch verschiedene Begründungsformen gekennzeichnet. Während für die Himmelsphysik wirkende Kräfte die Ursachen bilden, sind es im Falle der Weltharmonik geometrische Proportionen. Kepler spricht selbst von den Kräften als den Wirkursachen und von den Harmonien als den Zweckursachen[53]. Eine an Aristotelischen Konzeptionen orientierte Unterscheidung zwischen verschiedenen Ursachentypen macht für Kepler beide Begründungsformen miteinander verträglich. Darüber hinaus sind Keplers Konstruktionen in beiden Bereichen durch ein hohes Mass an Genauigkeit charakterisiert. Nicht nur in der Himmelsphysik, auch in der Weltharmonik bemüht sich Kepler um genaue Erklärungen astronomischer Sachverhalte. Philosophisch relevant sind gerade die Details der Naturordnung. Kepler vermeidet damit eine Naturphilosophie, die lediglich Ausdruck eines Lebensgefühls, einer von Bildern besetzten Weltsicht ist. Naturphilosophie und Naturerklärung sind eins.

[51] Ebd.
[52] Harmonice Mundi, KGW VI, 330, 360–361.
[53] Epitome, KGW VII, 338.

Darin kommt die grundlegende Einheitlichkeit der Keplerschen Naturphilosophie zum Ausdruck, die Einheit eines Kepler, der das Uhrwerk der Himmelsmaschine darzulegen sucht, und eines Kepler, der in einer von Kriegen zerrissenen Zeit dem friedlichen Wohlklang der Sphären lauscht. Die Keplersche Einheit von Naturphilosophie und Naturerklärung ist auch die Einheit von wissenschaftlicher Rationalität und Philosophie. Die Keplersche Wende, die hier aus wissenschaftshistorischen und wissenschaftstheoretischen Gründen einer Kopernikanischen Wende entgegengesetzt wurde, ist auch der Versuch, beide Elemente unserer Sicht der Dinge – das wissenschaftliche und das philosophische Element – auf eine harmonische Weise zur Geltung zu bringen.

Prof. Dr. Jürgen Mittelstrass, Zentrum Philosophie und Wissenschaftstheorie, Philosophische Fakultät, **Universität Konstanz**, Postfach 5560, D–7750 Konstanz 1.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/3: 216–223

Vierzehn wissenschaftsphilosophische Thesen zum Problem der «neuartigen Waldschäden»[1]

Gereon Wolters, Universität Konstanz

1 Einleitung

Manche von Ihnen werden sich verwundert gefragt haben, was ein Philosoph an einer Sanasilva-Tagung zu suchen hat. Das ist eine gewiss berechtigte Frage, denn Philosophie hat zum Thema Waldschäden von der Sache her nichts beizutragen: Philosophie fördert weder unser Wissen über Waldschäden, noch kann sie uns sagen, was dagegen zu tun ist. Das gilt im übrigen ganz generell: Philosophie vermittelt kein sachhaltiges Wissen über die Welt; sie ist auch nicht Technologie im weitesten Sinn, d.h. sie gibt keine Anleitungen dafür, wie man in der Welt zu handeln hat, um ein bestimmtes, bereits gestecktes Ziel zu erreichen. Philosophie besteht vielmehr in dem Versuch, Distanz zu gewinnen. Sie versucht, die Prozesse unserer Wissensgewinnung und unseres zweckorientierten Handelns gewissermassen «von aussen» zu betrachten. In diesem Sinne liefert sie kein Wissen über die Welt, sondern denkt über die Voraussetzungen, die Struktur und die Grenzen dieses Wissens nach; sie erteilt keine Anweisungen dafür, *wie* man gegebene Zwecke erreichen kann, sondern erarbeitet allenfalls Argumente, *warum* ein bestimmter Zustand als ein erstrebenswerter Zweck gelten soll. So gesehen hat die Philosophie zum Problem der Waldschäden dann doch etwas beizutragen, wenn auch «nur» aus der Distanzperspektive. Dafür sagt man auch: die Philosophie *reflektiert* dieses Problem. Ich will aus einer Reihe hier anstehender Fragen zwei herausgreifen. Die eine hat mehr mit unserem *Wissen* im Bereich der Waldschäden zu tun, die andere mehr mit unserem moralisch relevanten *Handeln*. Das heisst: die erste Frage ist eher *wissenschaftstheoretisch*, die zweite eher *wissenschaftsethisch*.

Im Empfinden und im Sprachgebrauch der Öffentlichkeit besteht eine ziemlich weitgehende *Analogie zwischen menschlichen Erkrankungen* einschliesslich ihres möglichen letalen Ausgangs *(«Waldsterben») und den sogenannten neuartigen Waldschäden* («der Wald ist *krank*»). Es scheint mir zweckmässig, die folgenden Überlegungen im Sinne dieser *Analogie von Waldschäden und Medizin* zu gliedern: Die medizinische Maschinerie pflegt sich in Gang zu setzen, sobald ein Patient mit einem oft eher diffusen Leidensgefühl den Arzt aufsucht. Dort erfolgt als erstes die genaue Feststellung der *Symptome* dieses Leidens, dann deren *Diagnose.* In der Diagnose werden die Symptome als Ausdruck eines Krankheitsbildes gedeutet, welches als durch bestimmte organische oder funktionale Defekte verursacht interpretiert wird. Nicht selten aber ist die genaue Verursachung eines bestimmten Krankheitsbildes den Medizinern unbekannt. An die Diagnose schliesst sich dann gewöhnlich ein *Therapieversuch* an, der im günstigen Falle zur Linderung oder gar Heilung des Ausgangsleidens führt.

Übertragen wir nun dieses Modell auf die Waldschäden: nachdem das Leiden in der Bundesrepublik schon etwas früher verspürt worden war, häuften sich ab etwa 1982 auch in der Schweiz Meldungen über Waldschäden bis dahin unbekannter Art und Ursache (vgl. Blattmann und Heuser 1988). Der Patient Wald bzw. seine forstlichen Vormünder und die durch diese informierte Öffentlichkeit fühlten sich alarmiert. So kam es zur – soweit ich sehe – ersten schweizerischen *Symptomatik* der Waldschäden in der Sanasilva-Waldschadeninventur 1984. Der Patient ist weiterhin genau beobachtet worden, wovon letztmalig der Sanasilva-Waldschadenbericht 1988 zeugt. Die *Diagnose* der Forstwissenschaftler und anderer Naturwissenschaftler stellte ziemlich eindeutig die Luftverschmutzung durch Schadstoffimmissionen als *den* ursächlichen Faktor heraus. Die alsbald in Angriff genommene *Therapie* bestand einerseits – wenn auch kaum in der Schweiz und auch sonst in nur unbedeutendem Umfang – im *Kurieren von Symptomen* (durch Walddüngung), andererseits in *Kausaltherapie* in Form politischer Massnahmen zur Reduktion der Luftschad-

[1] Vortrag an der Sanasilva-Tagung 1/89 (5. April 1989) der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Zürich/Birmensdorf.

toffe (z. B. durch Tempolimite und generell durch Versuche der Reduzierung des Individualver-
.ehrs, Luftreinhalteverordnungen usw.).

Sowohl die Symptomatik als auch die Diagnose (Waldschäden als Folge von Schadstoffim-
ıissionen der Luft) sind in letzter Zeit *ins Gerede gekommen*, und zwar bis zu dem erstaunlichen
}rad, dass selbst die Existenz des leidenden Patienten, d.h. eine über Früheres hinausgehende
ichädigung des Waldes, in Frage gestellt wird. Die folgenden Überlegungen konzentrieren sich
uf die Diagnose und die Therapie. Sie sollen vor allem der Klärung des wissenschaftstheoreti-
chen Status der Immissionshypothese dienen und das Spannungsverhältnis von Forstwesen,
Vissenschaft und Politik analysieren. Das soll natürlich nicht heissen, dass die Symptomatik und
.ort insbesondere die Frage: was heisst überhaupt «geschädigt?» wissenschaftstheoretisch unin-
:ressant wäre. Der Verlauf der Tagung machte vielmehr deutlich, in welch beträchtlichem Aus-
ıass hier noch begriffliche Grundlagenarbeit zu leisten ist, was auch für verwandte Begriffe wie
Vitalität», «Stress» und dergleichen gilt. Jedenfalls dürfte die medizinische Analogie «geschä-
igt/krank» auf diesem Gebiet noch eine Reihe Einsichten vermitteln (für die Medizin vgl. Can-
uilhem 1977).

Bei meinen Überlegungen und Thesen gehe ich ohne Begründung von der klassischen Auffas-
ung Max Webers aus, dass jedes Unternehmen, das den Namen «Wissenschaft» verdient, *wert-
rei* sein muss; und zwar in dem Sinne, dass die Gültigkeit wissenschaftlicher Resultate unabhän-
ig ist von der Persönlichkeit und den individuellen oder kollektiven Wertauffassungen der Wis-
enschaftler, die diese Resultate erbringen (Weber 1968). Hier sollte man freilich beachten, dass
war Wissenschaft wertfrei ist, Wissenschaft*ler* aber wie alle anderen Bürger Träger divergieren-
er politischer, sozialer, religiöser, ethischer, künstlerischer und was sonst noch für Wertauffas-
ungen sind und sich zudem in vielfältigen Zusammenhängen engagieren, z. B. für den Schutz des
Valdes. Ohne Zweifel resultiert aus der Wertfreiheit der Wissenschaft und der Wertgebundenheit
er Wissenschaftler ein prinzipielles *Spannungsverhältnis*. Dieses Spannungsverhältnis führt ei-
erseits gelegentlich zu Beeinträchtigungen der Wertfreiheit einschliesslich damit verbundener
vissenschaftsethischer Postulate, wie z. B. der Publizitätspflicht für Forschungsergebnisse (Markl
989, 49 f.), auch wenn sie einmal nicht zu eigenen Wertauffassungen und Engagements zu passen
cheinen. Ich möchte allerdings darauf aufmerksam machen, dass das Spannungsverhältnis zwi-
chen Wertneutralität der Wissenschaft und Wertgebundenheit des Wissenschaftlers auch noch
ine *andere*, zum gerade genannten Typ des Verstosses gegen die Wertfreiheit *komplementäre
eite* hat: nämlich Verfügbarkeit des Wissenschaftlers zu beliebigen Zwecken. Wie in Abschnitt 3
usführlicher begründet wird, ist ein Verständnis des Wissenschaftlers als eines reinen Datenliefe-
anten für beliebige technische und politische Zwecke mit dem Ethos der Wissenschaft nicht ver-
inbar.

! Die Immissionshypothese in wissenschaftstheoretischer Sicht

Nach ziemlich einhelliger Auffassung gelten die Waldschäden heute als *«Komplexkrankheit»*
Walderkrankung 1986, 20ff.). D.h. die Symptomatik der Waldschäden ist nicht das Resultat ei-
ıer einzigen Ursache, sondern ergibt sich aus dem Zusammenwirken einer Vielzahl von Faktoren.
Weiter ist die überwiegende Mehrheit der Forscher der Ansicht, dass Luftschadstoffe tatsächlich
:inen Kausalfaktor darstellen. Die Meinungen scheinen erst darüber auseinanderzugehen, ob
.uftschadstoffe auch eine wichtige oder gar die Hauptursache der Waldschäden darstellen. Für
etztere Auffassung scheint sich die Bezeichnung *Immissionshypothese* einzubürgern. Von der Im-
nissionshypothese heisst es nun häufiger, sie sei noch nicht «bewiesen» oder «direkt nachgewie-
en» oder ähnliches. Solche Bedenken wegen des wissenschaftstheoretischen Status der Immis-
ionshypothese kommen natürlich all jenen scheinbar gelegen, denen bittere politische Arzneien
rie «Massnahmen zur Einschränkung des Individualverkehrs» nicht schmecken. Dabei hängt
ieles an der Bedeutung der in diesem Zusammenhang oft verwendeten wissenschaftstheoreti-
chen Begriffe wie «Hypothese», «Beweis», «Verifikation», «Falsifikation». Diese und ver-
randte Begriffe sollen im folgenden kurz erläutert werden. Wichtige Sachverhalte formuliere ich
er leichteren Übersicht halber in Thesenform.

In der Wissenschaftstheorie unterscheidet man Beobachtungsaussagen, die sich auf einzelne, raum-zeitlich fixierte, also konkrete Sachverhalte beziehen, von sogenannten All- oder Allgemeinaussagen, die immer ganze Klassen von konkreten Sachverhalten zum Gegenstand haben. Zu den Allaussagen gehören die sogenannten Naturgesetze und auch alle Hypothesen über die Ursachen der Waldschäden. Die folgenden Ausführungen gelten nur für naturwissenschaftliche Allsätze im beschriebenen Sinn. Es ist ein insbesondere auf Karl Popper (Popper 1969; Chalmers 1986) zurückgehendes Ergebnis der Wissenschaftstheorie, dass sich naturwissenschaftliche Sätze nicht im gleichen Sinne ein für allemal logisch beweisen lassen wie Sätze der Mathematik. Selbst bei bisher als vollkommen verlässlich geltenden Sätzen gibt es keine Garantie dafür, dass sie auch morgen noch gültig sind: d.h. auch noch so viele positive Beobachtungen können einen naturwissenschaftlichen Satz *nicht verifizieren*. Dass morgen z.B. das Fallgesetz nicht mehr gilt, ist logisch ohne weiteres möglich, wogegen die plötzliche Nichtgeltung des Satzes von Pythagoras auch den Verlust der Logik und damit vollständige Orientierungslosigkeit bedeutete. Wenn also schon so etwas Übersichtliches und Verlässliches wie das Fallgesetz nicht strikt beweisbar ist, so gilt dieses Manko natürlich in viel grösserem Masse für alle Hypothesen in so unübersichtlichen Bereichen wie dem der Waldschäden. Hieraus ist folgendes Fazit zu ziehen:

These 1: Es gibt keine Verifikation naturwissenschaftlicher Sätze. Alle Sätze der Naturwissenschaften, auch die bewährtesten und verlässlichsten, sind Hypothesen.

Man beachte den Unterschied zwischen diesem *wissenschaftstheoretischen* Sprachgebrauch von «Hypothese», der auch so Gewisses und Verlässliches wie das Gravitationsgesetz, die Unschärferelation oder das Massenwirkungsgesetz mit einschliesst und dem *alltäglichen* Sprachgebrauch, nach dem Hypothesen eher Vermutungen sind, die auf schwachen Beinen stehen. Frage: Wenn sich Hypothesen nicht streng beweisen lassen, warum soll man sie dann akzeptieren? Das führt uns auf den Umstand, dass Hypothesen mehr oder weniger gut *bestätigt* sein können und auf

These 2: Der mehr oder weniger hohe Bestätigungsgrad, nicht aber der prinzipiell unerreichbare Nachweis der Wahrheit einer Hypothese ist es, der ihre Annahme oder Ablehnung in der Wissenschaftlergemeinschaft bestimmt.

Wenn es also gelegentlich heisst, die Immissionshypothese sei noch nicht «bewiesen», dann kann damit aus wissenschaftstheoretischer Sicht nur gemeint sein, dass sie nicht hinreichend bestätigt sei, um akzeptiert zu werden.

Was sind nun die *Bestätigungskriterien* für eine Hypothese? Von den in der wissenschaftstheoretischen Literatur angeführten und begründeten Kriterien ist das Kriterium *erfolgreicher empirischer Tests* das bei weitem wichtigste, aber nicht das einzige (Hempel 1974, Kap. 3): Weitere Bestätigungskriterien kommen hinzu, z.B. das «logische» Kriterium, dass eine Hypothese mit anderen, bewährten Hypothesen harmoniert. Damit haben wir

These 3: Das wichtigste Bestätigungskriterium für eine Hypothese ist, dass sie möglichst viele und verschiedenartige empirische Tests besteht. Daneben gibt es «logische» Kriterien wie die Verträglichkeit mit anderen, bewährten Hypothesen auf dem gleichen oder auf verwandten Gebieten.

Es ist leider so, dass es bislang keinerlei Verfahren gibt, den Bestätigungsgrad einer Hypothese zu quantifizieren und damit zu objektivieren. Es besteht ferner wenig Aussicht auf eine Besserung dieser Situation. Trotzdem müssen Wissenschaftler beständig zum Bestätigungsgrad von Hypothesen Stellung beziehen. Sie tun dies nach *pragmatischen Einschätzungen*, die weitgehend von ihrer Erfahrung als Wissenschaftler und ihrem wissenschaftlichen Urteilsvermögen abhängen. Aber auch wissenschaftsfremde Faktoren wie Wünschbarkeit oder politischer Druck können bei solchen Einschätzungen eine (störende) Rolle spielen. Gleichwohl ist es erstaunlich, wie einig sich Wissenschaftler meistens sind, trotz des Fehlens objektiv-quantitativer Beurteilungskriterien. Wir können nun formulieren:

These 4: Der Bestätigungsgrad und damit die Akzeptierbarkeit einer Hypothese lassen sich nicht quantifizieren. Die Annahme oder Ablehnung einer Hypothese in der Wissenschaftlergemeinschaft richtet sich nach pragmatischen Beurteilungsgesichtspunkten. An dieser Stelle liegen Möglichkeiten wissenschaftsexterner Beeinflussung der Annahme oder Ablehnung von Hypothesen.

Der *Test* einer Hypothese I sieht seiner logischen Struktur nach so aus: wenn I zutrifft, dann üssen unter spezifischen Randbedingungen R bestimmte beobachtbare Ereignisse B eintreten. reten nun diese Ereignisse B nicht ein, dann ist entweder I unzutreffend oder eine (bzw. mehre) der ebenfalls angenommenen oder vielleicht nicht einmal bemerkten Randbedingungen R ifft nicht zu. Ich will diesen etwas komplizierten Sachverhalt an einem einfachen von Hempel 974, Kap. 1) gegebenen Beispiel erläutern: Als der Arzt Ignaz Semmelweis im Wien der 40er ihre des vorigen Jahrhunderts nach einer Ursache für das in einer Klinik Wiens gehäuft auftrende Kindbettfieber suchte, stellte er die Hypothese auf, die Ursache des Kindbettfiebers liege irin, dass Medizinstudenten aus der Anatomie kommend mit nur ungenügend oder gar nicht geaschenen Händen Verrichtungen an den Schwangeren vornähmen. Er stellte unter der Randbengung gründlichen Händewaschens in Chlorkalklösung die empirische Testimplikation auf, iss das Kindbettfieber auf das anderwärts übliche Mass zurückgehen müsse. Semmelweis' natomiehypothese wurde alsbald glänzend bestätigt. Welche wissenschaftstheoretische Lage itte sich aber ergeben, wenn sich die Anatomiehypothese *nicht* bestätig hätte, die Sterberate in mmelweis' Klinik also nicht dramatisch gesunken wäre? Wäre damit die Anatomiehypothese *lsifiziert* worden? Die Antwort lautet: nicht ohne weiteres. Denn es hätte ja auch sein können, iss die Anatomiehypothese richtig war, aber die Randbedingung des desinfizierenden Effekts m Händewaschen in Chlorkalklösung falsch. Dies führt auf

These 5: Das Scheitern eines empirischen Tests einer Hypothese I bedeutet nicht notwendigereise die Falsifikation von I. Es kann genau so gut sein, dass eine oder mehrere der in diesem st als gültig angesetzten bzw. nicht einmal als vorausgesetzt bemerkten Randhypothesen R cht zutreffen.

Wenden wir uns nach diesen allgemeinen Vorbemerkungen der Immissionshypothese zu, d. h. r Annahme, dass Luftschadstoffe einen mindestens bedeutenden Kausalfaktor der Waldschän darstellen. Wie lässt sich diese Hypothese testen? Die Antwort lautet:

These 6: Die Immissionshypothese als solche ist nicht testbar. Ihr Bestätigungsgrad respektive sitiver empirischer Tests resultiert vielmehr aus dem Bestätigungsgrad ihrer Teilhypothesen. ie Immissionshypothese ist nämlich lediglich ein Begriff, unter dem eine Reihe von testbaren inzelhypothesen zusammengefasst werden. Diese Einzelhypothesen beziehen sich auf (1) die hadwirkung diverser Stoffe (z. B. SO_2, O_3), (2) auf unterschiedliche Schädigungsangriffspunkte ie Schadwirkung über Boden oder Blätter bzw. Nadeln, (3) auf unterschiedliche pflanzenphyologische Schädigungsverlaufstheorien und (4) auf Effekte, die durch spezifische (z. B. synergeche) Wechselwirkungen sowie durch unterschiedliche Randbedingungen wie Standort, Alter id Klima hervorgerufen werden. Es sind also allenfalls Teilhypothesen aus dem Bereich der Imissionshypothese konkret testbar und deshalb auch nur Teilhypothesen bestätigbar bzw. falsifierbar. Dies bedeutet insbesondere, *dass selbst eine gelungene Falsifikation einer Teilhypothese er Immissionshypothese keine Falsifikation der Immissionshypothese als ganzer darstellt.*

Ein weiterer Punkt ist genau zu beachten. Nach These 5 bedeutet das Scheitern eines Tests einer Hypothese nicht notwendigerweise die Falsifikation dieser Hypothese. Das Scheitern des ests könnte seine Ursache statt dessen in unberechtigterweise angesetzten Randbedingungen haen. Diese Möglichkeit ist in ökologischen Zusammenhängen angesichts der hohen *Komplexität* atürlicher Verhältnisse und der in ihnen waltenden Wechselbeziehungen mit ihren additiven, kuulativen, synergetischen oder antagonistischen Effekten immer sehr naheliegend. Infolgedessen stet auf ökologischen Forschungsergebnissen oft oder mindestens zunächst eine ziemliche Unewissheit. Es gibt (mindestens) drei Versuche, teilweise durch Isolation von natürlichen Randbeingungen, diese Beschränkung empirischer Testbarkeit von Teilhypothesen der Immissionshyothese abzuschwächen: (1) Begasungsexperimente im Labor, (2) Experimente im Wald, in denen ie Wirkungen gefilterter und ungefilterter Luft verglichen werden und (3) vergleichende Testbeachtungen im Wald. Bei aller Nützlichkeit sind diese Ansätze von begrenzter Aussagekraft: Laorversuche leiden darunter, dass sie nur einige ausgewählte Parameter einer im Vergleich mit r Natur interaktionsarmen Modellwelt untersuchen können; die Ergebnisse von Waldexperienten sind zunächst einmal nur für den jeweiligen Experimentalstandort gültig und nicht ohne eiteres verallgemeinerbar; vergleichende Testbeobachtungen leiden unter der Unkenntnis unterhiedlicher Randbedingungen und Wechselwirkungen. Es darf deshalb von der Wissenschaft im

Zusammenhang mit der Stützung bzw. der Widerlegung der Immissionshypothese nicht zuviel verlangt werden (allerdings auch nicht zuwenig). Ich formuliere die

These 7: Teilhypothesen der Immissionshypothese sind nur unter günstigen Bedingungen schlüssig testbar, da die Testergebnisse unter dem Vorbehalt zureichender Berücksichtigung der Randbedingungen stehen. Empirische Tests von Teilhypothesen der Immissionshypothese haben volle Aussagekraft allenfalls für die jeweils getesteten Teilhypothesen. Ihre Bedeutung für die Immissionshypothese insgesamt bedarf sorgfältiger Extraabwägung.

Gleichwohl ist es so, dass wohl die weitaus meisten Wissenschaftler von der Richtigkeit der Immissionshypothese überzeugt sind. Ich kann als Laie die Berechtigung für diese Beurteilung bei meinem Stand der Kenntnisse über den testmässigen Bestätigungsgrad der Teilhypothesen nicht zureichend nachprüfen, sehe jedoch keinen vernünftigen Grund an der Beurteilung der Wissenschaftlergemeinschaft zu zweifeln, zumal die Immissionshypothese starke, *indirekte Stützung* aus anderen Gebieten erhält: so sind etwa seit langem Waldschäden durch Industrierauch bekannt sowie weitere «klassische» Waldschäden; auch immissionsbedingte Schäden an landwirtschaftlichen Nutzpflanzen sind nachgewiesen; ferner kann die Schädigung animalischer Organismen, insbesondere des Menschen, durch Luftschadstoffe als eine hochbestätigte Hypothese gelten. Die Immissionshypothese fügt sich so in einen grösseren, wohlbestätigten Zusammenhang der Schädigungsmöglichkeiten von Organismen durch Bestandteile der Umgebungsluft. Solche Einordnung von Hypothesen in hochbestätigte grössere Zusammenhänge gilt – man vergleiche These 3 – nächst dem Kriterium des Bestehens zahlreicher und vielfältiger Tests als wichtige Bestätigung einer Hypothese.

Ferner ist es nicht ohne Bedeutung, dass es keine hinlänglich erhärtete, alternative Erklärung gibt. Eine solche wäre z. B. der Nachweis, dass sich die heutigen scheinbaren Waldschäden durchaus noch in einem «natürlichen» Schwankungsbereich befänden. Für diese aus philosophisch-begrifflicher Sicht attraktive Auffassung hat Bucher ein interessantes Mass vorgeschlagen. Dieses Mass beruht – immer beschränkt auf Schweizer Verhältnisse – auf der plausiblen Annahme, dass es jedenfalls bis 1950 keine neuartigen Waldschäden gegeben habe. Sodann wird versucht, die Erhebungskriterien des Sanasilva-Programms mit forstlichen Befunden aus der ersten Jahrhunderthälfte zu korrelieren. Sollte sich dieser Ansatz erhärten lassen, dann wäre das Problem «Waldsterben» seinerseits gestorben. Diese Einschätzung wird jedoch von der Mehrheit der Forscher nicht geteilt. Auf jeden Fall wird aber sichtbar, wie wichtig die bislang vernachlässigte Klärung der Grundbegriffe wie «Krankheit» oder «Schädigung» im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden ist. Nach der derzeit herrschenden Lehrmeinung ist also zu formulieren

These 8: Die Immissionshypothese als ganze wird durch die nachgewiesene Möglichkeit von Schädigungen an Wäldern durch Industrierauch, ferner durch die nachgewiesene Möglichkeit von Schädigungen landwirtschaftlicher Nutzpflanzen und animalischer Organismen sowie durch ihre bisherige Alternativlosigkeit gestützt.

Nach dem bisher Gesagten ist die Beurteilung des Bestätigungsstatus der Immissionshypothese eine Aufgabe umfassender wissenschaftlicher Abwägung. Diese Abwägung ist jedoch von einer Art, dass sie den einzelnen Wissenschaftler im Normalfall überfordert. Denn die Probleme, mit denen unsere Gesellschaft zu kämpfen hat, tun uns selten den Gefallen, sich an den Grenzen der etablierten wissenschaftlichen Disziplinen zu orientieren. Das gilt auch und insbesondere für die Waldschäden. Hier ist interdisziplinäre Forschung erforderlich. Aber auch allfällige Einschätzungen und Abwägungen von Forschungsergebnissen lassen sich nicht disziplinenisoliert, sondern nur *interdisziplinär* treffen. Interdisziplinarität kann hier jedoch nicht beim blossen, koordinierten Nebeneinander der Disziplinen stehenbleiben, sondern verlangt vom Forscher ein *transdisziplinäres* Verständnis von Methoden und Resultaten der beteiligten Nachbardisziplinen (Mittelstrass 1987). Dies sei formuliert als

These 9: Abwägungen im Bereich der Immissionshypothese fordern von den beteiligten Forschern interdisziplinären Austausch und transdisziplinäre Orientierung.

Wir sehen also, dass die simplistische Frage: Immissionhypothese ja oder nein? so nicht beantwortbar ist. Der Geltungsstatus dieser komplexen Hypothese verlangt vielmehr viel differenziertere Qualifikationen. In diesem Sinne lässt sich – den gegenwärtigen Forschungsstand und das bisher Erörterte dennoch kurz zusammenfassend – sagen:

These 10: Die Immissionshypothese kann als eine ziemlich gut bestätigte allgemeine Diagnose der neuartigen Waldschäden gelten.

3 Politische und ethische Implikationen der Immissionshypothese

Die Diagnose der Waldschäden kann nach den Überlegungen des vorigen Abschnitts trotz vieler offener Fragen so lauten: die Waldschäden sind durch Luftschadstoffe in bedeutender Weise mindestens mitverursacht. Zwar kann niemand diese Diagnose mit der gleichen Überzeugung äussern wie z. B. das Fallgesetz oder andere hochbestätigte Hypothesen; wenn wir aber darauf warten wollten, bis die Diagnose der Waldschäden einen solchen Bestätigungsgrad wie einfache physikalische Gesetze erreicht hat, dann müssten wir sehr viel Zeit haben, die aber nicht zur Verfügung steht. Denn im Unterschied zu den meisten sonstigen naturwissenschaftlichen Hypothesen ist eine zutreffende Waldschadensdiagnose kein rein akademisches Problem. Vielmehr besteht – mit einem neudeutschen Entschlossenheitsausdruck gesagt – *Handlungsbedarf*, in grösserem Kontext gesehen vielleicht sogar dringender Handlungsbedarf. Denn aus den Waldschäden resultieren in grösserem oder geringem Umfang und in unterschiedlicher zeitlicher Perspektive – teilweise auch ökonomisch quantifizierbare (vgl. z. B. Altwegg 1988) – mögliche Folgeschäden wie Lawinenniedergänge, Steinschlag, Erdrutsche, Hochwasser, Bodenerosion, Verlust «grüner Lungen», Verlust von «Lärmdämpfern», Verlust von Klimastabilisatoren und Lebensraum vieler Arten, Zwangsnutzung, Verlust von Kultur- und Erholungslandschaft und wohl noch manches andere mehr. Es ist nicht empfehlenswert, das tatsächliche Eintreten solcher Folgeschäden jeweils abzuwarten und erst dann zu handeln. Ein solches Zuwarten scheint wegen der möglichen Schadensgrösse, aber auch wegen möglicher Irreversibilität der Schäden nicht vertretbar. Wegen der Kleinheit und Langsamkeit ihrer Effekte müssen kurative Massnahmen deshalb in einem möglichst frühen Stadium des Schädigungsprozesses in Angriff genommen werden. Anders gesagt: die Walderkrankung verlangt mehr oder weniger *dringend* nach *Therapie*. Hier ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten: *Symptomtherapie* und *Kausaltherapie*. Die Möglichkeiten der Symptomtherapie, die ausser dem Staats- bzw. dem Waldbesitzersäckel niemandem etwas kosten würde, sind leider ziemlich begrenzt – jedenfalls in der Schweiz (Sanasilva 1988a). Bleibt also die Kausaltherapie, die sich kurz als *Reduktion von Luftschadstoffen* charakterisieren lässt. Somit

These 11: Wirksame Therapie der neuartigen Waldschäden besteht in der Reduktion von Luftschadstoffen.

An dieser Stelle trägt die Analogie Medizin–Waldschäden nicht mehr: in der Medizin ist der Arzt von der Symptomatik bis zur Therapie die primär handelnde Person. Bei den Waldschäden aber tritt auf der Therapieebene ein Wechsel des primären Agenten auf: das Problem erreicht eine *politische Dimension*. Denn der Kausaltherapie, Reduktion «atmogener Stoffe» (Mohr 1986), stehen *widerstreitende Interessen* entgegen, die ihre Durchführung behindern oder sogar in Teilen unmöglich machen können. Konflikte dieser Art müssen *politisch* gelöst werden. Das ist im vorliegenden Fall grundsätzlich auf zweierlei Weise möglich: (1) *ökodiktatorisch* durch rigorose Vorordnung von Umwelt- und damit auch Waldschutzinteressen vor allen entgegenstehenden Interessen. Ökodiktatorische Radikalrezepte haben vor allem unter den Jüngeren ihre Sympathisanten. Sie müssen sich allerdings unter anderem mit einem historisch gestützten Einwand gegen jede Art von (Tugend-)Diktatur auseinandersetzen: die durch Diktaturen erst geschaffenen Übel sind stets grösser gewesen als diejenigen, zu deren Beseitigung diktatorische Mittel für erforderlich gehalten wurden. *Ökoterroristische* Strategien, wie man sie z.B. in der Bundesrepublik findet, scheiden als Ablösung von Politik durch Verbrechen aus unserer Betrachtung von vornherein aus. Bleibt also (2) der *demokratische Interessenausgleich*, wie er die westlichen Demokratien als Frucht der Aufklärung bestimmend prägt. Der demokratische Grundsatz des Interessenausgleichs geht davon aus, dass alle Betroffenen gleichberechtigt sind, wenn auch ihre jeweils vertretenen Interessen nicht gleiches Gewicht besitzen. Sie müssen ihr relatives Gewicht vielmehr im öffentlichen Diskurs, d.h. argumentativ *rechtfertigen*. Konkret geht dieser öffentliche Diskurs nahtlos in die politische Auseinandersetzung über. (Notabene scheint es deswegen zweckmässig, wenn auch von ökologisch interessierter Seite neben rein argumentativen Mitteln auch bewährte Mittel der Meinungsbeeinflussung wie Schulerziehung, Psychologie und Werbung eingesetzt werden.)

Die Therapie der Waldschäden ist so zwar eine primär politische Angelegenheit. Einschlägige Forschungsresultate spielen aber in der öffentlichen Auseinandersetzung eine wichtige Rolle. Denn politische Massnahmen, die Teilen der Bevölkerung Opfer zumuten, müssen sich in ihrer Unumgänglichkeit legitimieren und im politischen Gesamtkonzept einer Regierung oder eines Regierungsbündnisses mehrheitsfähig sein. In diesem politischen Legitimationsprozess spielen Forschungsergebnisse als der Intention nach neutrale und objektive Instanzen für die Politikberatung und für die politische Argumentation in der Öffentlichkeit eine wichtige Rolle: z.B. Wissenschaftler sollen mögliche Konsequenzen politischer Tatenlosigkeit abschätzen; sie sollen erwartbare Resultate politischer Massnahmen quantifizieren; von ihnen wird Stellungnahme zur Notwendigkeit politischer Massnahmen verlangt. Somit

These 12: Die Realisierung der Schadstoffreduktion ist ein politisches Problem. Wissenschaftler spielen jedoch eine wichtige Rolle in der Politikberatung und bei der öffentlichen Legitimation entsprechender politischer Massnahmen.

Freilich wird von den Wissenschaftlern hier seitens der Politik gelegentlich zuviel erwartet: Wissenschaftler können keine von Politikern so erwünschten Ja/Nein-Antworten geben (vgl. These 10). Ihre Forschungsergebnisse haben – insbesondere auf die Immissionshypothese als ganze bezogen – immer nur eine begrenzte Bedeutung. Auch wenn Wissenschaftler zu politischen Lösungen durchaus beitragen, so können und sollen sie nicht die Legitimationsprobleme von Politikern lösen:

These 13: Die Legitimation politischer Massnahmen zur Schadstoffreduktion ist eine primär politische Aufgabe, die von der Wissenschaft objektivierend unterstützt werden kann. Wissenschaftliche Objektivierung kann jedoch politische Interessenabwägung und politische Durchsetzungskraft nicht ersetzen.

Die Interessen, die hier gegeneinander abgewogen werden müssen, sind im wesentlichen Industrie- und Arbeitsplatzinteressen sowie Individualverkehrsinteressen auf der einen und jene in Abschnitt 2 spezifizierten Interessen an der Erhaltung des Waldes auf der anderen Seite. Zusätzlich zu den Walderhaltungsinteressen sind für die politische Abwägung aber auch noch die schon genannten Interessen hinzuzurechnen, die aus anderen Gründen (z.B. solchen menschlicher Gesundheit, der Erhaltung landwirtschaftlicher Nutzböden, des Gewässerschutzes; ferner die Schonung nicht erneuerbarer Energiequellen) für eine drastische Reduktion von Luftschadstoffen sprechen. Notabene zeigt sich hier, dass politische Massnahmen zur Luftreinhaltung weder mit der Immissionshypothese stehen, noch auch mit ihr zu fallen brauchen.

Abwägungen zwischen konfligierenden Interessen sind immer auch *ethische* Abwägungen. Insofern ist die politische Auseinandersetzung auch eine Auseinandersetzung darum, welche Handlungsfolgen und erkennbare Risiken anderen, einschliesslich nachfolgenden Generationen zugemutet werden können (vgl. dazu allgemein Jonas 1979, Beck 1986; für ein spezielles Beispiel Gethmann 1987). Diese Fragen müssen hier unerörtert bleiben. Es lässt sich aber feststellen, dass in der *ethischen* Diskussion den ökologischen Interessen hohe Priorität eingeräumt wird. In Ländern wie der Schweiz ist auch die *politische* Entscheidung im Interessenkonflikt Industrie/Arbeitsplätze/Individualverkehr versus Umwelt *im Prinzip* zugunsten der Umwelt gefallen. Die praktisch entscheidende Frage ist aber, *bis zu welchem Grade* ökologische und damit auch Walderhaltungsinteressen politischen Vorrang erhalten. Diese Frage ist im demokratischen Staat nicht mit einem einfachen gordischen Streich oder gar emotionsfrei zu lösen, da z.B. die Reduktion des Individualverkehrs tiefliegende Interessen derjenigen Teile der Bevölkerung betrifft, für die das Auto und alles, was mit seiner möglichst uneingeschränkten Bewegung zusammenhängt, einen wichtigen, wenn nicht gar den zentralen Lebensinhalt darstellt. Es ist dieses interessen-, wert- und affektgesättigte Umfeld, in welches forst- und naturwissenschaftliche Forschungsergebnisse zu Umfang und Ursachen der Waldschäden hineingestellt sind. Wissenschaftler können sich nicht in den Elfenbeinturm zurückziehen mit der These, ihre Zuständigkeit sei mit der Produktion und Publikation von Forschungsergebnissen zu Ende; was aus den Ergebnissen technisch oder politisch gemacht werde, liege generell ausserhalb ihrer Verantwortung. Manchmal wird eine solche Auffassung durch Verweis auf das Postulat der Wertneutralität verteidigt. Tatsächlich aber muss die Argumentation gerade umgekehrt verlaufen: das Postulat der Wertneutralität fordert vom Waldschadensforscher zu beobachten, welcher Gebrauch von seinen Forschungsergebnissen ge-

macht wird und ob dieser Gebrauch den Forschungsergebnissen gerecht wird. Dies bezieht sich sowohl auf die korrekte Wiedergabe dieser Ergebnisse selbst (z.B. in den Medien) als auch auf deren Interpretation im Gesamtzusammenhang der Forschung.

These 14: Das Ethos der Wissenschaft verlangt von den Wissenschaftlern eine angemessene Interpretation ihrer Forschungsergebnisse im Gesamtzusammenhang des jeweiligen Forschungsbereichs sowie ihren «argumentativen Geleitschutz» in der öffentlichen Auseinandersetzung.

Eine *linguistische Bemerkung* zum Schluss: in diesen Thesen war von Bürgern, Wissenschaftlern, Politikern usw. die Rede. In gleicher Weise wie diese männlichen Funktionsträger sind selbstverständlich auch ihre weiblichen Pendants gemeint, was direkt auszudrücken die deutsche Sprache nur um den Preis erheblicher Umständlichkeit erlaubt.

4 Literatur

Altwegg, D., 1988: Die Folgekosten von Waldschäden. Bewertungsansätze für die volkswirtschaftlichen Auswirkungen bei einer Beeinträchtigung der Schutzfunktion von Gebirgswäldern. Diss. St. Gallen.

Beck, U., 1986: Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne. Suhrkamp, Frankfurt.

Blattmann, H. und Heusser, H., 1988: Wie steht es um das Waldsterben? In: Neue Zürcher Zeitung Nr. 269 vom 17. November, Separatabdruck S. 2.

Canguilhem, G., 1977: Das Normale und das Pathologische. Ullstein, Frankfurt u.a.

Chalmers, A.F., 1986: Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie. Springer, Berlin u.a.

Gethmann, C.F., 1987: Ethische Aspekte des Handelns unter Risiko. In: VGB Kraftwerkstechnik *67*, 1130–1135.

Hempel, C.G., 1974: Philosophie der Naturwissenschaften. dtv, München.

Jonas, H., 1984: Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation. Suhrkamp, Frankfurt 1984.

Markl, H., 1989: Wissenschaft: Zur Rede gestellt. Über die Verantwortung der Forschung. Piper, München und Zürich.

Mittelstrass, J., 1987: Die Stunde der Interdisziplinarität? In: J. Kocka (ed.): Interdisziplinarität. Praxis – Herausforderung – Ideologie. Suhrkamp, Frankfurt.

Mohr, H., 1986: Die Erforschung der neuartigen Waldschäden: Eine Zwischenbilanz. In: Biologie in unserer Zeit *16.3.* 83–89.

Popper, K.R., 1969: Logik der Forschung. Mohr, Tübingen (3. Aufl.).

Sanasilva, 1984: Ergebnisse der Sanasilva-Waldschadeninventur 1984. EAFV, Birmensdorf.

Sanasilva, 1988: Sanasilva-Waldschadenbericht 1988. EAFV, Birmensdorf.

Sanasilva, 1988a: Düngung: Eine Perspektive für den Schweizer Wald? Sanasilva-Tagungsbericht. EAFV, Birmensdorf.

Walderkrankung 1986: Walderkrankung und Immissionseinflüsse. Eine Information des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg. Stand Januar 1986.

Weber, M., 1968: Soziologie. Weltgeschichtliche Analysen. Politik, ed. J. Winckelmann. Kröner, Stuttgart (4. Aufl.), bes. 311–339 («Vom inneren Beruf zur Wissenschaft»).

Prof. Dr. Gereon Wolters, Fachgruppe Philosophie und Zentrum IV (Philosophie und Wissenschaftstheorie) der Universität Konstanz, Postfach 5560, D-7750 Konstanz 1

Vorträge der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich Wintersemester 1988/89

31. Oktober 1988:
Prof. Dr. *Manfred Milinski*, Ethnologische Station Hasli, Universität Bern
Konkurrenten, Feinde, Parasiten und die Überlebensstrategien des Dreistachligen Stichlings
Ein kleiner Fisch wie der Stichling muss fast ständig zwei verschiedene Aufgaben gleichzeitig erfüllen, nämlich fressen und vermeiden, gefressen zu werden. Der beste Kompromiss zwischen beiden hängt ab vom aktuellen Feindrisiko, vom eigenen Energiebedarf, und davon, was seine Konkurrenten tun und was seine Parasiten wollen, dass er tut. Parasiten können den Kompromiss beeinflussen durch Erhöhung des Energiebedarfs ihres Wirts, durch Veränderung seiner Konkurrenzfähigkeit und auch dadurch, dass sie sein Verhalten direkt manipulieren, so dass er leichter durch den Endwirt oder einen Vektor gefressen werden kann.

14. November 1988:
Prof. Dr. *Hans-Ulrich Dütsch*, Zürich
Das Ozonloch: Bildung und mögliche globale Konsequenzen
Seit Ende der 70er Jahre wurde im antarktischen Frühjahr eine rasche Abnahme des stratosphärischen Ozongehalts auf weniger als die Hälfte beobachtet, und man spricht etwas irreführend von einem Ozonloch. Diese Abnahme kann weder mit der bis anhin für die Erklärung der stratosphärischen Ozonschicht entwickelten photochemischen Theorie noch als Folge einer veränderten stratosphärischen Zirkulation verstanden werden. Sie ist durch neuartige chemische Prozesse bedingt, die unter den extremen meteorologischen Bedingungen am Ende der antarktischen Polarnacht ablaufen, und bei denen die rasch steigende Belastung der Atmosphäre durch die anthropogenen Chlorfluorwasserstoffe eine entscheidende Rolle spielt.

Die zusätzliche, hier in Erscheinung tretende Ozonsenke bewirkt eine Reduktion dieses Spurengases auch in Teilen der Südhemisphäre ausserhalb der Antarktis. Ob ähnliche Vorgänge unter wesentlich anderen meteorologischen Voraussetzungen auch in der Arktis mit Auswirkungen auf die Nordhemisphäre auftreten können, ist noch umstritten.

28. November 1988:
Prof. Dr. *Ingo Potrykus*, Institut für Pflanzenwissenschaften ETHZ, Zürich
Gen-Transfer bei Pflanzen
In den vergangenen 5 Jahren sind Methoden entwickelt worden, welche es ermöglichen, isolierte Erbfaktoren (als DNS-Moleküle) in das Erbgut von Pflanzen zu übertragen. Die «fremden» Erbfaktoren verhalten sich dort wie die ursprünglichen Pflanzengene. Diese neuartige und gezielte Veränderung von Pflanzen wird von den einen als Chance zur Verbesserung von Kulturpflanzen, von anderen als grosse Gefahr gesehen. Im Anschluss an eine Darstellung der Möglichkeiten des Gentransfers mit Pflanzen ist der Autor gern bereit, Fragen nach möglichen Gefahren zu diskutieren.

12. Dezember 1988:
Gesundheit und Ernährung
(Podiumsgespräch und Diskussion)
Teilnehmer:
Prof. Dr. *F. Gutzwiller*, Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Zürich
Prof. Dr. *R. Humbel*, Institut für Biochemie der Universität Zürich
Prof. Dr. *W. Vetter*, Departement für Innere Medizin, Universität Zürich
Prof. Dr. *B. Wüthrich*, Dermatologische Klinik und Poliklinik, Universität Zürich
Prof. Dr. *G. Zbinden*, Institut für Toxikologie, ETH und Universität Zürich, Schwerzenbach
Leitung:
Prof. Dr. *A. Borbély*, Pharmakologisches Institut der Universität Zürich

). Januar 1989:
Prof. Dr. *Anton Valavanis*, Abteilung für Neuroradiologie, Universität Zürich, Zürich
Neue bildgebende Verfahren für die Untersuchung des Gehirns und seiner Erkrankungen
Eine nicht voraussehbare technologische Entwicklung in den letzten 15 Jahren hat es ermöglicht, physikalische Phänomene, wie die Absorption von Röntgenstrahlen, die Reflexion von Ultraschallwellen und die magnetische Resonanz für medizinisch-diagnostische Zwecke nutzbar zu machen. Dabei hat sich das Gehirn, welches über Jahrzehnte hinweg einer direkten Darstellung entging, als Hauptanwendungsgebiet der modernen bildgebenden Verfahren erwiesen. Die zentrale Stellung für die Untersuchung des Gehirns nimmt heute die magnetische Resonanz-Tomographie ein. Sie ermöglicht nicht nur die Darstellung der inneren Architektur des Gehirns beim Lebenden und die Erfassung kleinster Krankheitsherde, sondern vermittelt auch vorher nicht möglich gewesene Einblicke in das räumliche und zeitliche Verhalten von Hirnerkrankungen.

!3. Januar 1989:
Erdwärmenutzung in der Schweiz: Erschliessungsstand und Perspektiven
(Podiumsgespräch und Diskussion)
Referent: Prof. Dr. *Ladislaus Rybach*, Institut für Geophysik, ETH, Zürich
Koreferenten:
Kurt Fehr, Ing. HTL, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich
Dr. *Lukas Hauber*, Kantonsgeologe, Basel-Stadt
Leitung:
Prof. Dr. *Stephan Müller*, Institut für Geophysik, ETH Zürich
In der Schweiz konzentriert sich die Erdwärmenutzung auf die Erschliessung natürlicher Wärmeträger niedriger Enthalpie. Künstliche Zirkulationssysteme der untiefen Geothermie haben die Marktreife erlangt (über 3000 Erdwärmesonden-Anlagen mit Bohrtiefen von 50–100 Metern in Betrieb). Neuerdings gewährt der Bund für Erschliessungsbohrungen tiefliegender Kluft- und Schicht-Aquifere eine Risikodeckung bis zu 80%. Nach einem kurzen Abriss der wissenschaftlichen Grundlagen der Geothermie werden Beispiele vorgestellt und künftige Entwicklungsmöglichkeiten (z.B. Hot Dry Rock-Systeme zur Stromerzeugung) aufgezeigt.

). Februar 1989:
Prof. Dr. *Norbert Straumann*, Institut für theoretische Physik der Universität Zürich
Neutrinophysik und Supernova-Explosionen
Am Ende der thermonuklearen Evolution von massiven Sternen wird das ausgebrannte Innere des Sternes instabil und stürzt in fast freiem Fall in sich zusammen. Dabei entsteht ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Die äusseren Teile des Ausgangssternes können unter Umständen durch eine gewaltige Schockwelle abgestossen werden. Dieses kosmische Feuerwerk erscheint uns dann als Supernova. Der grösste Teil der beim Kollaps freigesetzten Energie wird aber in Form von Neutrinos abgestrahlt. Dieser Neutrinopuls konnte anlässlich der Supernova-Explosion 1987 A in der Grossen Magellanschen Wolke nachgewiesen werden. Damit konnten unsere theoretischen Vorstellungen im Detail überprüft werden.

20. Februar 1989:
Prof. Dr. *François Fricker*, Justus-Liebig-Universität Giessen, BRD
Was ist Mathematik? – Versuch einer Antwort von aussen
Die Vorstellungen, was die Mathematik sei und womit sie sich beschäftige, sind oft auch bei sonst hochgebildeten Menschen ziemlich abstrus. Anhand einer – auch dem Laien zugänglichen – Betrachtung «von aussen» soll der Versuch unternommen werden, die gängigsten Vorurteile gegenüber dieser Wissenschaft abzubauen.

Buchbesprechungen

Hans Leibundgut: Unsere Laubwälder; Natur, Zustand, Bewirtschaftung. Verlag Paul Haupt, Bern 1988, 107 Seiten, Fr. 42.–.

Im Rahmen der Serie «Unser Wald» des em. Prof. Dr. H. Leibundgut, des langjährigen Dozenten für Waldbau an der ETH, ist aus seiner Feder der neueste Band «Unsere Laubwälder» erschienen. Diese Publikation gelangt zu einer Zeit an die Öffentlichkeit, in der die Wertung unserer Wälder weit stärker als früher von ökologischem Gedankengut geprägt wird. Eine Parallele zum in Beratung stehenden neuen Waldgesetz ist nicht zu übersehen.

Dieses auf den ersten Blick dünn anmutende, aber reich illustrierte Bändchen birgt gewichtiges Gedankengut, wie wir es als Schüler und Leser seiner wertvollen Publikationen seit jeher gewohnt sind. Klarheit des Ausdruckes und leicht fassliche Verständlichkeit auch nicht ganz einfacher waldbaulicher Probleme, die die langjährige Lehrtätigkeit des Autors charakterisierten, ziehen sich wie ein roter Faden durch diese Präsentation unserer vielgestaltigen Laubwälder. Zudem werden am Schluss des Bandes die wichtigeren Fachausdrücke erklärt und damit auch dem forstlichen Laien die Texte leicht zugänglich gemacht.

Anlehnend an die Systematik von Ellenberg und Kötzli werden von den dort 71 beschriebenen Waldgesellschaften deren 40 aus Laubbäumen aufgebauten vorgestellt. Diese bedecken heute noch rund 150 000 ha, d.h. annähernd einen Siebentel des schweizerischen Waldareales. Etwa die Hälfte der Laubwaldgesellschaften wird von der Buche dominiert und beansprucht weitaus den grössten Teil des Laubwaldareales. Der Rest ist auf weniger ausgedehnte Sonderstandorte angewiesen, verdient aber wegen seiner ausserordentlichen Vielgestaltigkeit unser Interesse, das weit über seine lokal beschränkte wirtschaftliche Bedeutung hinausgeht.

Die informative Gesamtschau der Laubwälder skizziert zunächst einmal die Architektur der Bestände und die gegenseitigen Beziehungen der darin vorkommenden Baumarten, wertet ihr Ertragsvermögen und ihre zunehmende wirtschaftliche Bedeutung für den Innenausbau und die Möbelindustrie im Lichte der rasch schwindenden Tropenholzvorräte. Mit der Schilderung der natürlichen Lebensabläufe in den Laubwäldern wird die Basis zum modernen naturnahen Waldbau gelegt, der heute dem Aufbau der mehr denn je gefragten multifunktionalen Wälder dient. Daraus leitet sich die Pflege und Verjüngung der Laubwälder ab, denen der Altmeister des Waldbaues schweizerischer Prägung ein besonderes Kapitel widmet.

Sympathisch berührt der Schlussabschnitt, in dem der Verfasser zeigt, in welch hohem Masse die Erscheinung des Waldes und im besonderen des Laubwaldes die Literatur, Malerei und Musik inspiriert hat. Wir gehen mit dem Autor einig, wenn er hofft, dass diese informative Hymne auf unsere Laubwälder einen Beitrag zu den Bemühungen um die Erhaltung unserer Laubwaldreste und zur Rückwandlung standortsfremder Wälder in Laubbaumbestände zu leisten vermag.»

Alfred Lichti

Hermann Wurmbach: Grundzüge einer speziellen Zoologie. Aus dem Nachlass herausgegeben von Michael Abs und Marianne Dörrscheidt-Käfer. 119 Seiten, 65 Abbildungen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1989, DM 54.–.

Aus dem Nachlass von Hermann Wurmbach, bestens bekannt durch seine «Spezielle Zoologie», dem «Wurmbach», der mehr als eine Generation von Zoologen begleitete, haben Michael Abs und Marianne Dörrscheidt-Käfer die Quintessenz jener Gedanken und Grundsätze herausgearbeitet, nach welchen sich dieser bedeutende Systematiker beim Konzept und der Realisation seines Lebenswerks orientierte.

Dieses Konzept besticht durch seine Transparenz und den logischen Aufbau. Als Phylogenetiker klassischer Prägung sieht Wurmbach die ganze Natur als ein System von Organisation und Höherorganisation, nicht nur von intrazellulärem bis zu überindividuellem Niveau, sondern auch in Raum und Zeit. Was man an Wurmbach besonders schätzt und was ihn zu einer unangefochtenen Autorität machte, war seine Fähigkeit zur Integration. Er vermied es stets, sich vorbehaltlos einer der scheinbar gegensätzlichen Strömungen in der Speziellen Zoologie anzuschliessen und sich damit in sinnlose Richtungskämpfe einzulassen. Vielmehr bemühte er sich, von jeder dieser Schu-

n brauchbar und gültig Erscheinen-
zuholen und es zu einer Gesamt-
ıtegrieren.
/urmbach alles andere als ein reiner
r war, sondern ein induktiv arbei-
scher mit einem starken Bezug zum
dlichen, belegen eine grosse Zahl
rragenden Abbildungen, deren Vor-
lbst gezeichnet hat.
orliegende Buch gibt verständlich
aulich einen Überblick über Metho-
rundsätze, die zur Erarbeitung eines
schichtlich orientierten Systems
wohl aus der Sicht eines Klassikers
n, der schon in die Wissenschaftsge-
ingegangen ist, hat es auch heute
Gültigkeit.
n Systematiker bildet die Lektüre
hes einen Genuss, für den weniger
ebiet Vertrauten einen Profit.

Vincent Ziswiler

/echsel von Johann Bernoulli (Band
ıturforschende Gesellschaft Basel
442 Seiten, Birkhäuser Verlag, Ba-
8, Fr. 168.–.

ammelten Werke der Mathematiker
cer der Familie Bernoulli werden im
er Naturforschenden Gesellschaft
der Otto-Spiess-Gesellschaft heraus-
Mehrere Bände sind schon erschie-
Herausgabe der Korrespondenz von
st im gleichen Rahmen in Bearbei-
vird voraussichtlich 4 Bände umfas-
ste, im Jahre 1955 erschienene (und
mte) Band war der Korrespondenz
ı Bruder Jakob und mit dem Mar-
lôpital gewidmet. Die weiteren wer-
Korrespondenz mit dem Franzosen
gnon enthalten. Die ersten Arbeiten
Herausgabe wurden schon 1938 von
stabel begonnen. Durch den Krieg
ıen, wurden sie 1943 durch J.O.
in weitergeführt. Nach dem Tod
enstein im Jahre 1977 konnte Costa-
eine Mitarbeiterin Jeanne Pfeiffer)
vonnen werden. Die Bearbeitung ist
nd, und die weiteren Bände werden
n Interesse erwartet.
Varignon wurde im Jahre 1654 in
ren. Er kam aus einfachen Verhält-
l konnte nur dank seiner Einwei-
Priester an der Universität studie-
ren. 1687 kam in Paris sein «Projet d'une nouvelle mécanique» fast gleichzeitig wie die «Principia» von Newton in London heraus. Das wissenschaftliche Milieu in Paris war, in keinem Verhältnis zum wahren Wert des Buches, sehr beeindruckt, und Varignon wurde ein Jahr später zum Mitglied der französischen Akademie der Wissenschaften gewählt. Varignon lehrte Mathematik am Collège Mazarin und gleichzeitig griechische Philosophie am Collège de France bis zu seinem Tode 1722. Obwohl er kein Mathematiker ersten Ranges war, nahm Varignon in den wissenschaftlichen Kreisen von Paris eine hervorragende Stellung ein. Er spielte eine wichtige Vermittlerrolle zwischen Bernoulli und der Akademie und war massgebend an der Einführung der Differentialrechnung in Frankreich beteiligt.

Bernoulli besuchte Varignon im September 1692 in Paris nach einem Aufenthalt bei de l'Hôpital. Diesem direkten Kontakt folgte eine ununterbrochene Korrespondenz bis zum Tod von Varignon. Mit der Zeit wurden die Beziehungen zwischen beiden sehr freundlich und die Briefe enthalten manchmal ganz interessante Angaben über die Familie Bernoulli.

Die Briefe Varignons liegen als Original noch vor, jene von Bernoulli sind mit dem ganzen Nachlass Varignons verschollen. Dank eingenhändigen Entwürfen von Bernoulli konnte jedoch ein wichtiger Teil des Briefwechsels rekonstruiert werden.

Die Korrespondenz bietet eine Fülle von Informationen über das wissenschaftliche Leben jener Zeit, insbesondere über den Betrieb an der Akademie. Sie enthält auch viele Angaben über mathematische und physikalische Probleme. Insbesondere geben die hier publizierten Briefe einen interessanten Einblick in den Streit der beiden Brüder Jakob und Johann über die Lösung des isoperimetrischen Problems und in den von Rolle geführten Angriff gegen das Infinitesimal-Kalkül. Rolle war ein Zeitgenosse Varignons und wie dieser Mitglied der Akademie.

Der vorliegende Band beschreibt die Periode von 1692–1702. Während dieser Zeitspanne sind folgende Themen überragend:

1) Probleme bei der Anwendung der Differentialrechnung (Briefe 1–20).

2) Die Brachystochrone und das isoperimetrische Problem. Der Streit mit seinem Bruder (Briefe 21–52).

3) Die Lumineszenz des Quecksilbers. Die

Dispute von Rolle mit Varignon (Briefe 53–72).

Der Anhang enthält bisher unveröffentlichte Schriften über die Kontroverse zwischen Rolle und Varignon und weitere kleinere Arbeiten. Das Buch schliesst mit mehreren sehr sorgfältig ausgearbeiteten Verzeichnissen.

M.-A. Knus

Klaus Immelmann et al., Hrsg.: Psychobiologie, Grundlagen des Verhaltens; 888 Seiten, 269 Abbildungen, 34 Tabellen; Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1988. DM 118.–.

Ein gutes und schönes Lehrbuch empirischer, biologisch-evolutionär orientierter, die (zoologische) Ethologie miteinbeziehender Psychologie ist anzuzeigen. «Psychobiologie ist eine Naturwissenschaft, die darauf abzielt, Verhalten exakt zu beschreiben, in seinen Zusammenhang und seine Ursachen zu analysieren und in seiner Entwicklung zu erklären.» Psychobiologie sieht auch menschliches Verhalten als Ergebnis der Evolution. Damit beginnt die kulturelle Evolution. Biogenetische und tradigenetische Evolution greifen ineinander.

Vor uns liegt ein fast 900 Seiten starkes, grossformatiges Lehrbuch des menschlichen Verhaltens hinsichtlich seiner Beziehung zum Tierverhalten, seiner physiologischen, psychologischen Grundlagen, seiner Entwicklung in der biologischen und kulturellen Evolution. In der Einleitung werden verschiedene Begriffsumschreibungen von Verhalten erörtert. Die Struktur des Lehrbuches: Evolution und Funktion des Verhaltens. Die sogenannte Anpassung, Evolution und Kultur. Die ontogenetische Entwicklung des Verhaltens mit einem Abschnitt über die Bedeutung des Spiels. Determinanten und Mechanismen des Verhaltens; biologische Rhythmen, Motivation und Emotion, Stress, Lernen, Handeln, Problemlösen, Entscheiden. Das Selbst. Soziale Einflüsse, Vorurteile, Kooperation und Konflikt. Zugänge und Methoden; Vergleich von Arten, Tier und Mensch, von Kulturen. Kommunikation; nonverbal und sprachlich. Soziale Organisation; gesellschaftliche Rolle, Familie und Kleingruppe. Gesellschaftliche Gruppen und Institution. Psychobiologie und Politik (Rationalität, Norm, Moral, Gerechtigkeit). Der Anhang enthält Lösungen für die im Lehrtext gestellten Fragen, Bibliographie, Personen- und Sachregister.

Das Buch ist sehr gut gemacht: übersichtlich und klar gegliedert, flüssig geschrieben und leicht lesbar. Hinweise auf Experimente zeigen den Duktus der Argumentation, so dass der Leser zum Nachvollzug eingeladen ist und nicht elitäres Offenbarungswissen aus der Tiefenschau eines Eingeweihten andächtig empfangen muss. Das Buch ist so eine ausgezeichnete und verdienstvolle «gehobene» Einführung und Übersicht, ein sehr geeignetes Lehrbuch für Psychologen, Mediziner (gerade auch Psychiater), Biologen, interessierte Laien anderer Fächer. Das Buch ist, bedenkt man den Reichtum des Vermittelten (ohne dessen Beschränkung auszublenden) und die Lehrqualität, sehr preiswert.

C. Scharfetter

Hinweise für Autoren

1 **Manuskript**

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle . . .).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild . . .) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 134, Heft 3, September 1989

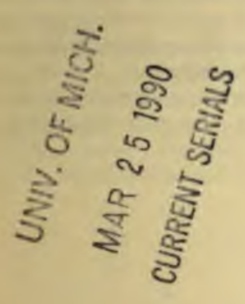
Inhalt

Preis Fr. 16.–

Heft 4
Jahrgang 134
Dezember 1989

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard



Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind von der Aktuarin der Naturforschenden Gesellschaft, *Frau Elisabeth Rufener, Baltenswilerstrasse 28, 8303 Bassersdorf,* zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 75.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt,* das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich).* – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042-5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134/4*: 229–250

Hydrobiologisches Bachinventar der Stadt Zürich

Verena Lubini-Ferlin, Zürich

Zwischen 1986 und 1988 sind auf dem Gemeindegebiet der Stadt Zürich 84 Bäche mit einer Gesamtlänge von rund 70 km hydrobiologisch erfasst worden. Zehn Bäche wurden faunistisch genauer untersucht, wobei das Schwergewicht der Untersuchung bei den Insekten lag. Insgesamt konnten 109 Taxa nachgewiesen werden, darunter 12 Eintagsfliegen-, 14 Steinfliegen- und 48 Köcherfliegenarten. Zwei Eintagsfliegenarten (*Baetis scambus* und *Ecdyonurus helveticus*) und zwei Larvenhabitate der Gestreiften Quelljungfer *(Cordulegaster bidentatus)* sind neu für den Kanton Zürich. Es zeigte sich, dass grössere Bäche mit regelmässiger Wasserführung und hoher Strukturvielfalt in der Regel eine reichere Fauna enthalten als zeitweise trockenfallende, kleine Bäche. Grössere Wasserpflanzenbestände kommen im Sagentobelbach, Dorfbach Affoltern und Katzenbach vor. Ein Vergleich der Stein- und Köcherfliegenfauna im Wehrenbach und Stöckentobel mit Artenlisten aus dem letzten Jahrhundert deutet auf einen Wandel im Artenspektrum hin. Die ökologische Beurteilung ergab für achtzehn Bäche oder Bachabschnitte gute Ergebnisse.

Ecological Survey of Streams within the City of Zurich

The habitat structure of 84 streams with a total length of 70 km was surveyed from 1986 to 1988 within the city limits of Zurich. The faunal composition of ten selected streams was studied in more detail. Twelve species of mayflies, fourteen species of stoneflies and 48 species of caddisflies were found. For the first time in the canton of Zurich, I recorded the occurrence of species of mayfly, *Baetis scambus* and *Ecdyonurus helveticus*, and found larvae of the dragonfly *Cordulegaster bidentatus* at two new localities. Overall, 109 taxa were recorded during the study. In general, more species were found in large and highly structured streams with a regular water flow than in small streams with a periodic water flow. Waterweeds in high abundance were found in Sagentobelbach, Dorfbach Affoltern and Katzenbach. The evaluation revealed that eighteen out of 84 streams were in a satisfactory ecological condition. A comparison of my fauna list with data from the end of the last century suggests that the fauna composition of stoneflies and caddisflies in Wehrenbach and Stöckentobel has changed over this period.

1 Einleitung

Wenn heute im Naturschutz von schutzwürdigen Lebensräumen bedrohter Tier- und Pflanzenarten gesprochen wird, dann ist meistens von Feuchtgebieten, Magerwiesen, Auenwäldern oder Hecken die Rede. Fast vollständig vernachlässigt wurden dagegen bis heute die kleineren Fliessgewässer. Dies ist um so erstaunlicher, als Bäche auf den Menschen zu allen Zeiten eine grosse Anziehungskraft ausgeübt haben. Fliessendes Wasser galt unseren Vorfahren als Bild des Lebens oder Inbegriff des Frischen und Reinlichen. Im Märchen hat der Bach gelegentlich sogar heilende Wirkung. Mit der beginnenden Verschmutzung vieler Bäche am Ende des vorigen Jahrhunderts ging die ursprünglich innige Beziehung zum Bach für viele Menschen verloren. Bäche

wurden vorab im Siedlungsraum zu Transportwegen für Abwässer aus Haushalt und Industrie. Aus hygienischen Gründen wurden die kleineren daher kanalisiert und eingedolt, so auch auf dem Gebiet der Stadt Zürich, wo sie allmählich im Kanalnetz verschwanden. Noch Mitte des letzten Jahrhunderts verzeichnet die Wildkarte 160 km offene Bachläufe, 1988 sind es noch rund 70 km. Mehr als 70 Strassen- und Quartiernamen erinnern heute an die ehemals offenen Stadtbäche.

Über die Fauna der städtischen Fliessgewässer ist bisher wenig bekannt geworden. Die ersten Meldungen stammen von August Hermann Hagen, der 1865 nach Angaben von Johann Jakob Bremi-Wolf eine Liste der Libellen, Köcher-, Eintags- und Steinfliegen der Umgebung von Zürich veröffentlichte (A. H. Hagen, 1865). In den 80er Jahren begann dann Friedrich Ris als junger Medizinstudent die Insektenfauna Zürichs zu erkunden. Von ihm stammen genauere Angaben zur Fauna verschiedener Bäche, vor allem vom Zürichberg und von der Region des Katzensees. Einige Belegexemplare befinden sich in der Sammlung am Entomologischen Institut der ETH in Zürich. Nach dem Tode von Ris im Jahre 1931 gerieten Zürichs Bäche und ihre Fauna in Vergessenheit. Erst als 1984 das Kantonale Libelleninventar (C. Meier, 1989) die grosse Bedeutung von Fliessgewässern als Lebensraum für ökologisch spezialisierte Arten dokumentierte, wurden Bäche als Naturschutzobjekte in Betracht gezogen.

Das Gartenbauamt der Stadt Zürich ist seit ein paar Jahren daran, Inventare zur heutigen Fauna und Flora der Stadt erstellen zu lassen. Bis heute sind Amphibien, Reptilien, Vögel und Fledermäuse inventarisiert worden. Eine Vegetationskartierung und ein Insekteninventar sind in Bearbeitung. Während das Tiefbauamt für sämtliche Bäche der Stadt in den 70er Jahren eine Bachkartei mit technischen Angaben zusammengestellt hat, sollte das Schwergewicht des vom Gartenbauamt der Stadt Zürich in Auftrag gegebenen Bachinventars[1] auf der biologischen Erfassung des Bachzustandes liegen. Ziel der Arbeit war es, sämtliche Bäche auf Stadtgebiet hydrobiologisch zu untersuchen und diejenigen zu bestimmen, die nach ihrer Bedeutung ins Inventar der kommunalen Naturschutzobjekte gehören. Zehn Bäche aus dem Inventar wurden faunistisch genauer untersucht. Dies sollte die Kenntnis der heutigen Fliessgewässer-Fauna auf Stadtgebiet erweitern, vor allem auch im Hinblick auf einen Natur-Atlas der Stadt. Dank der Sammeltätigkeit von F. Ris und einiger Literaturangaben ist es in Einzelfällen möglich, die Entwicklung der Fauna in den letzten hundert Jahren darzustellen.

[1] Die Arbeit wurde vom Gartenbauamt der Stadt Zürich finanziert. Dr. M. Sartori vom Zoologischen Museum der Universität Lausanne, Dr. M. Brancucci vom Naturhistorischen Museum in Basel und Dr. C. Ravizza, Mailand, halfen mir bei der Bestimmung von Eintags-, Steinfliegen und Käfern. Dr. G. Bächli vom Zoologischen Museum der Universität Zürich stellte mir ein Lichtfanggerät zur Verfügung und die Entomologische Gesellschaft Zürich lieh mir zeitweise ihren Generator. Dr. H. Arter und L. Birch redigierten den englischen Text. Ihnen allen danke ich herzlich für die Unterstützung.

2 Methoden

In einer ersten Phase wurden alle Bäche auf ihrer gesamten Länge einmal abgeschritten und mittels eines standardisierten Protokollblattes beschrieben.

Während dieser Begehung ist, neben der Flora, an mehreren Stellen mit verschiedenen Methoden wie Kick-sampling, Umdrehen von Steinen und Ablesen der darunter verborgenen Tiere die Fauna protokolliert worden. Jeder Bach wurde auch photographisch dokumentiert. Das Protokollblatt enthält zudem Angaben zur Bachmorphologie, Wasserführung, Gewässerbelastung, Bachbett- und Ufervegetation sowie eine Faunenliste mit den wichtigsten taxonomischen Gruppen. Beigefügt sind überdies ein Kurzbeschrieb, der Gesamteindruck sowie Entwicklungsmöglichkeiten und Vorschläge zur Optimierung. Für jeden einheitlichen Abschnitt wurde ein Protokollblatt ausgefüllt, so dass sich pro Bach mehrere Beschreibungen ergeben können. Für die 84 untersuchten Bäche wurden 108 Protokollblätter ausgefüllt, die in einem separaten, unveröffentlichten Anhang zusammengestellt sind, wozu auch Pläne im Massstab 1:5000 gehören, auf denen die Bäche mit den Fotostandorten eingezeichnet sind.

Diese ersten Begehungen fanden in den Sommer- und Herbstmonaten 1986 statt. Weil dieser Zeitraum wegen der damals herrschenden Trockenheit und aus phänologischen Gründen ungünstig war, wurde im Frühling 1988 ein Grossteil der Bäche ein zweites Mal besucht.

In einer zweiten Phase 1987 konzentrierte sich die Untersuchung auf eine Auswahl von zehn verschiedenartigen Bächen. Es sind dies: Wehrenbach, Stöckentobelbach, Wisbach, Seitenarm des Hubbachs, Läufebach, Höcklerbach, Döltschibach, Bach Nr. 3, Leimbach und Katzenbach. Je nach Länge und Struktur wurden pro Bach jeweils ein bis mehrere Bachabschnitte von ca. 50 m Länge ausgewählt und mit den gleichen Methoden wie bei der ersten Begehung nach Kleintieren, insbesondere Libellen, Eintags-, Köcher- und Steinfliegen abgesucht. Die nicht lebend bestimmbaren Tiere wurden in 80% Alkohol konserviert, allenfalls präpariert und danach unter dem Binokular oder Mikroskop bis auf die Art bestimmt. Da dies bei den meisten Köcherfliegen im Larvenstadium nicht möglich ist, wurden als Ergänzung Lichtfänge mit Tageslicht und UV durchgeführt. Schwierige Arten wurden zur Überprüfung Spezialisten vorgelegt. Die Untersuchung erfolgte monatlich und erstreckte sich von März bis Oktober 1987.

3 Die Bäche der Stadt – ein Überblick

Heute fliessen auf Stadtgebiet 84 Bäche (Bild 1) mit einer Gesamtlänge von rund 70 km (Tabelle 1). Ein Vergleich mit der Wildkarte zeigt, dass das Fliessgewässernetz im Laufe der Stadtentwicklung stark geschrumpft ist. Während die meisten Bäche in der offenen Kulturlandschaft ganz (z.B. Haldenbach,

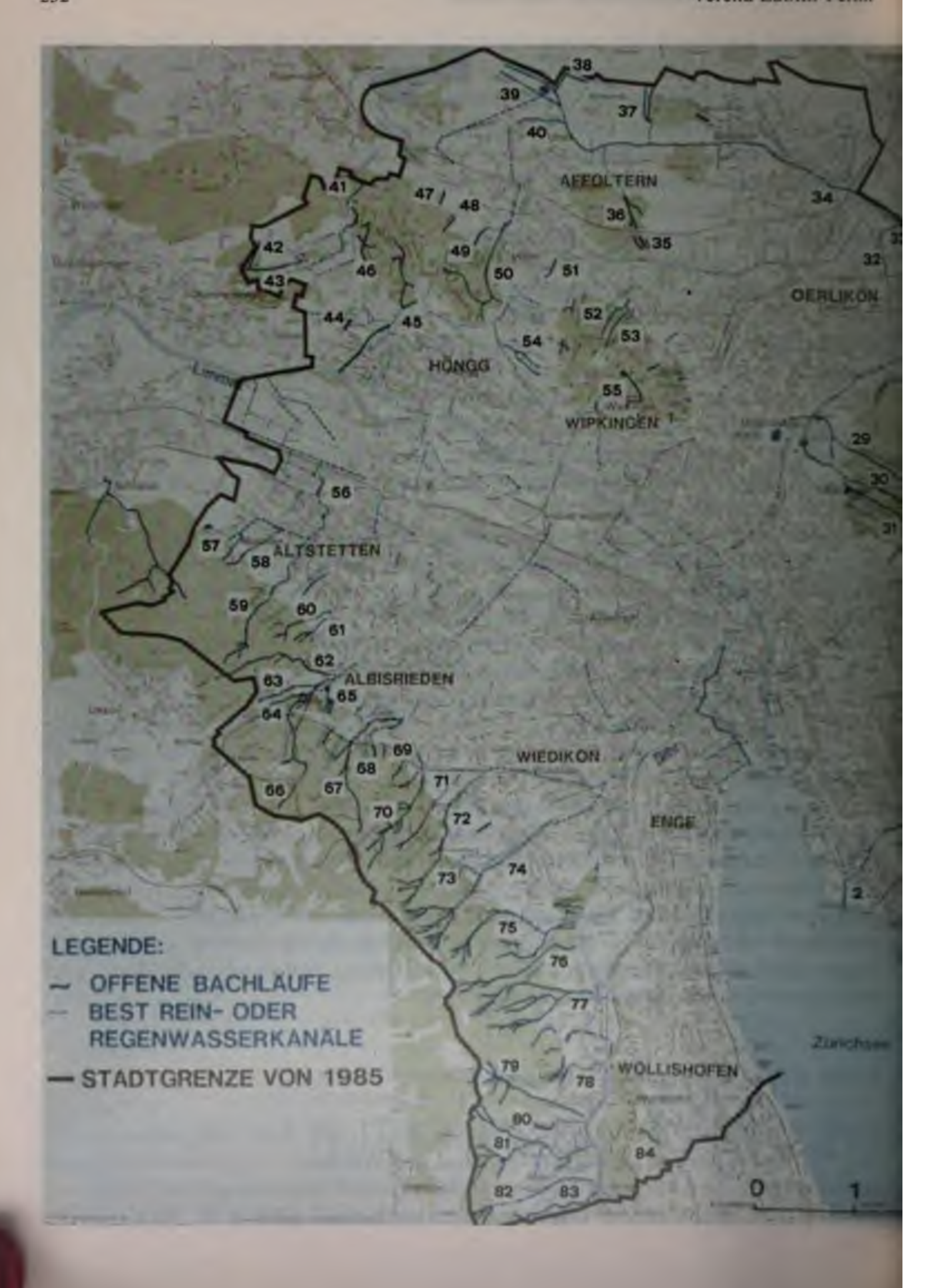

AFFOLTERN
OERLIKON
HÖNGG
WIPKINGEN
ALTSTETTEN
ALBISRIEDEN
WIEDIKON
ENGE
WOLLISHOFEN
LEGENDE:
OFFENE BACHLÄUFE
BEST REIN- ODER REGENWASSERKANÄLE
STADTGRENZE VON 1985

Bild 1 Die 84 hydrobiologisch untersuchten Bäche der Stadt Zürich. Die Nummern bezeichnen die in Tabelle 1 namentlich aufgeführten Bäche.

Fig. 1 The map shows the 84 streams surveyed. The streams are numbered after table 1.

Kreuzbach, Letzigraben) oder teilweise eingedolt worden sind, profitierten si im Wald von seinem Schutz: mehr als die Hälfte aller Bachkilometer fällt de halb auf bewaldetes Gebiet (48,160 km); bedeutend weniger auf das offen Kulturland (14,210 km) und den Siedlungsraum (8,415 km). Ein Drittel alle erfassten Bäche ist heute noch von der Quelle bis zur Mündung offen (2 Bäche), die anderen haben meist eingedolte Unterläufe.

Eine weitere Folge der zahlreichen Eindolungen ist der Verlust des ehe mals vernetzten Gewässersystems: Anstatt in die grösseren Flüsse oder in de See, münden heute die meisten Bäche in Mischwasserkanäle, die das sauber Bachwasser der Kläranlage zuleiten. Nur noch wenige Bäche fliessen offen i den Zürichsee, die Limmat, die Glatt oder in die Sihl (Bild 2).

Zahlreiche Bachläufe haben zudem an Länge eingebüsst. Dies kann, wi etwa beim Klosbach oder beim Albisrieder Dorfbach, mehrere Kilomete betragen. Viele Bäche sind deshalb relativ kurz. Nur sieben Bäche sind meh als 2 km lang; mit einer Länge von mehr als 5 km sind Katzenbach und Wel renbach/Wildbach/Hornbach die längsten. Die Länge hat Einfluss auf di Vielfalt der Lebensgemeinschaft und trägt zur Stabilität des Ökosystems be Lange Bäche sind oft wegen der von der Quelle bis zur Mündung wechseln den Physiographie strukturreicher und enthalten deshalb eine artenreicher Lebensgemeinschaft als kurze. Auch ist das Ökosystem längerer Fliessgewäs ser im allgemeinen gegen Störungen von aussen, z. B. durch Gewässerver schmutzung oder Unterhaltsarbeiten zur Unzeit, weniger stark gefährdet.

4 Fauna

Da eine genaue faunistische Untersuchung aller Stadtbäche zu aufwendig geworden wäre, beschränkte sie sich auf die in Tabelle 2 beschriebenen zehn Bäche respektive Bachabschnitte, die auch stellvertretend für andere als Anschauungsobjekte gelten können. Damit soll ein Einblick in die Stadtzür cher Bachfauna ermöglicht werden.

Bild 2 Ökologische Bewertung der Stadtzürcher Bäche. Die Kästchen fassen Bäche des glei chen Fliessgewässersystems zusammen. Die Anordnung von links nach rechts entspricht de Längsgliederung von der Quelle bis zur Mündung in die grösseren Flüsse oder in den See. Kursi geschriebene Bachnamen bezeichnen Bäche, die als Seitenbäche keine Verbindung zum Haupt bach haben, oder solche, die in Mischwasserkanälen enden. In Klammern stehen heute nich mehr existierende Bäche. Die den Bachnamen vorangestellten Buchstaben sind Abkürzungen fü die im Text erläuterten Bewertungsstufen, die Nummern entsprechen denjenigen von Bild 1.

Fig. 2 Ecological assessment of the streams in the city of Zurich. Names of streams within frame belong to the same watershed. The arrangement from left to right corresponds to the longi tudinal zonation from spring to river or lake. Names written in italics indicate streams with an in terrupted course. Streams in brackets are no longer in existence. The letters A, B, C in the figur represent the ecological classification system described in the text. Numbers correspond to figure 1.

Ch	*4 Bach am Raintobelweg*					
Ch	5 Krebsbach					
Chs	*6 Bach am Segetenweg*					
B	7 Segetenbach	A*	3 Wehrenbach			
Ch	8 Bach aus dem Wiesliacker			B	3 Wildbach	
A	9 Witikonerbach			Cs	2 Hornbach	ZÜRICHSEE
A	*17 Hegibach*					
Cs	*18 Klosbach*					
Cs	13 Seitenarm Loorenbach					
A	14 Loorenbach	A*	12 Stöckentobelbach			
A	15 Bächlein in der Schleife					
A	16 Degenriedbächlein					
Cs	*1 Nebelbach*					
Chs	*84 Moosbach*					
Cas	22 Forrenweidbach					
Cas	23 Bächlein vom Zoo	B	24 Sagentobelbach			
A	21 Rebrainbach					
A	20 Adlisbergbach					
Cs	28 Schwesternbungertbach	B	*27 Brandbach*			
Cu	10 Im kl. Lybenstein	A*	11 Wisbach			
A*B	25 Leimbach	B	26 Hirzenbach			
Cs	*49 Bach in der Rüti*					
Cas	*48 Hungerbach*	B	*50 Holderbach*			
Csh	*54 Rohrgraben*					GLATT
		Cs	40 Dorfbach Affoltern			
B	*53Altoosbächlein*					
Csh	*36 Wolfswinkelgraben*					
C	39 Mittelgraben			Cas	34 Katzenbach	
Cu	38 Eichriedgraben					
Cs	*37 Riedenholzgraben*					
Chs	*52 Graben im Althoos*					
Csh	*35 Binzmühlebach*					
Chs	*29 Seitenarm Spitalerbach*	Cas	32 Riedgraben	Cas	33 Leutschenbach	
Cs	*30 Spitalerbach*					
Cas	*31 Neugutbach*					
Csh	*47 Graben im Hungerberg*					
Csh	*41 Graben im Oberlee*					
Cs	42 Weidtobelbach	Cshs	*43 Fürtlibach*			
Ch	*46 Steinwiesenbächli*					
Chs	*57 Talbächli*					
Csh	*58 Salzwegbächli*					
Cs	*59 Girhaldenbach*		(Juchgraben)			
Cs	*56 Unterdorfbach*					
Csh	*60 Feldgüetlibach*					
Csh	*61 Algierbach*					
A	*65 Bach Nr. 3*					
B	*62 Emmetbach*	B	*63 Albisrieder Dorfbach*			
A	64 Seitenarm Hubbach	Cs	66 Hubbach			LIMMAT
Cas	68 Sädlenbach	A*Cs	*67 Läufebach*			
A	*69 In den Rütenen*		(Letzigraben)			
Chs	*70 Döltschibach*					
Cs	*72 Friesenbergbach*					
Cs	*71 Seitenarm Friesenbergbach*					
B	*55 Wolfgrimbach*					
Chs	45 Bombach					
B	*31 Peterstobelbach*					
Cs	*44 Riedhofbächli*					
Cs	*19 Wolfbach*					
Cs	73 Talwiesenbach	Chs	*74 Kolbenhofbach*			
Cs	75 Albisgüetlibach					
Cu	76 Sarbentalbach					
A*BCs	77 Höcklerbach					
Csh	*78 Bach beim Friedhof*					SIHL
B	79 Rütschlibach					
Csu	*80 Tutschgenbach*					
A Cs	81 Hüslibach					
A Cs	82 Risbach					
Cas	83 Schwarzbach					

Tabelle 1 Die Bäche der Stadt Zürich, nach den Nummern von Bild 1 geordnet. Die Zahlen in den Kolonnen geben die in der jeweiligen Umgebung gemessene Bachlänge in Metern an. Der Buchstabe vor dem Bachnamen bedeutet: u = Unterlauf eingedolt; o = Oberlauf eingedolt; m = mittlerer Abschnitt eingedolt.

Table 1 Characterization of the investigated streams from the city of Zurich. Nr. – Code number (see Fig. 1). Underground part of the stream: u = lower course; o = upper course; m = middle course. Length (in metre) of habitat along the stream, from left to right: forest habitat; agricultural land; urban area and total length.

Nr.		Bach	Wald	Kulturland	Siedlungsraum	Gesamtlänge
1	u	Nebelbach		600	770	1370
2		Hornbach			525	525
3		Wildbach			1300	1300
3	o	Wehrenbach	3000			3000
4	o	B. am Raintobelweg	340			340
5		Krebsbach	125			125
6	o	B. am Segetenweg	510			510
7	o	Segetenbach	350			350
8		B. aus dem Wiesliacker	150			150
9		Witikonerbach	1150			1150
10		Im kl. Lybenstein		70		70
11	o	Wisbach	450			450
12		Stöckentobelbach	3100			3100
13	o	Seitenarm des Loorenbachs	150			150
14		Loorenbach	550			550
15		Bächlein in der Schleife	550			550
16		Degenriedbach	800			800
17	u	Hegibach	700			700
18	u	Klosbach		300		300
19	u	Wolfbach	1200			1200
20		Adlisbergbach	1400			1400
21		Rebrainbach	1100			1100
22		Forrenweidbach	575			575
23		Bächlein vom Zoo	500			500
24		Sagentobelbach	950	150		1100
25	o	Leimbach	470	350	280	1100
26		Hirzenbach			750	750
27	u	Brandbach	2000	420	80	2500
28		Schwesternbungertbach	300			300
29	u	Seitenarm des Spitalerbachs	500			500
30	u	Spitalerbach	700			700
31	u	Peterstobelbach	850			850
32	o	Riedgraben			450	450
33	o	Leutschenbach			280	280
34	o	Katzenbach		3550	1600	5150
35	u	Binzmühlebach	480			480
36	u	Wolfswinkelgraben	350			350
37	u/o	Riedenholzgraben	700			700
38	o	Eichriedgraben		200		200
39		Mittelgraben		600		600

Nr.		Bach	Wald	Kultur-land	Siedlungs-raum	Gesamt-länge
40	o	Dorfbach Affoltern		540		540
41		Graben im Oberlee	150			150
42	o	Weidtobelbach	300			300
43	o	Fürtlibach	400			400
44	u/o	Riedhofbächli		60		60
45		Bombach	700		700	1400
46	u	Steinwiesenbächli	200			200
47	u	Graben im Hungerberg		100		100
48	u	Hungerbach		400		400
49	u/o	Bach in der Rüti		30		30
50	u	Holderbach	1200			1200
51	u	Neugutbach			310	310
52	u	Graben im Althoos	250	130		380
53	u	Althoosbächlein	450			450
54	u	Rohrgraben		800		800
55	u/o	Wolfgrimbach	400			400
56	u/o	Unterdorfbach			190	190
57	u	Talbächlein		450		450
58	u	Salzwegbächlein	150			150
59	u	Girhaldenbach	700		230	930
60	u	Feldgütlibach	200			200
61	u	Algierbach	250	340		590
62	u	Emmetbach	1000	200		1200
63	u/o	Dorfbach Albisrieden	200	650		850
64		Seitenarm des Hubbachs	550			550
65	u	Bach Nr. 3		230		230
66	u	Hubbach	1400			1400
67	u	Läufebach	1420		330	1750
68	o	Sädlenbach			120	120
69	u	In den Rütenen	200			200
70	u	Döltschibach	1500			1500
71	u	Seitenarm des Friesenbergbachs	1070	80		1150
72	u	Friesenbergbach	1400			1400
73		Talwiesenbach		320		320
74	u	Kolbenhofbach	800	750	250	1800
75		Albisgüetlibach	2050	350		2400
76		Sarbentalbach	1300			1300
77		Höcklerbach	2110	240		2350
78	u	Bach beim Friedhof		400		400
79		Rütschlibach	1000			1000
80	u	Tutschgenbach		270		270
81		Hüslibach	1940	400		2340
82	m	Risbach	730	300	250	1280
83		Schwarzbach		930		930
84	u	Moosbach	140			140
		Total	48160	14210	8415	70785

Tabelle 2 Die zehn faunistisch genauer untersuchten Bäche, respektive Bachabschnitte

Table 2 The ten streams selected for fauna survey.

Nr.	Bach	Kurzbeschrieb
3 12 70	Wehrenbach, Stöckentobelbach Döltschibach	Wehrenbach und Stöckentobelbach sind naturnah verbaute, grössere *Tobelbäche*, der Döltschibach ein mit hohen Abstürzen verbauter Waldbach, der im Sommer streckenweise trockenfällt.
64 11 67 25	Seitenarm des Hubbachs Wisbach Läufebach Leimbach	Natürliche, *kleinere Waldbäche:* Der Läufebach, ein Oberlauf in steilem Gelände, der etwa 100 m durch ein gerodetes Waldstück fliesst, der Leimbach mit bestocktem Unterlauf.
77 65 34	Höcklerbach Bach Nr. 3 Katzenbach	*Unbestockte Bäche/Bachabschnitte:* Bach Nr. 3, ein kleiner Wiesengraben, der im Sommer gerne trokkenfällt, der Katzenbach, ein grösserer Wiesenbach mit streckenweisem Längsverbau aus Holz. Einziger Bach mit submerser Vegetation.

Das Schwergewicht der Untersuchung lag bei den Insekten, insbesondere den Eintags-, Stein- und Köcherfliegen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in diesen zehn Bächen gefundenen wirbellosen Tiergruppen. Insgesamt konnten 109 Taxa nachgewiesen werden. Es fällt auf, dass am Katzenbach Tiergruppen vorkommen, die in Waldbächen fehlen. Dies ist vor allem dem Auftreten von Wasserpflanzen zuzuschreiben, in denen Schnecken und Wasserkäfer Nahrung und Unterschlupf finden. Die im Sommer relativ hohen Wassertemperaturen begünstigen ausserdem die Entwicklung verschiedener Egelarten, die sich von Zuckmückenlarven und Schnecken ernähren.

Wie ein Vergleich der Artenzahlen zeigt, sind strukturreiche, grössere Bäche mit regelmässiger Wasserführung wie Katzenbach, Stöckentobel- oder Wehrenbach relativ artenreich, während zeitweise trockenfallende, kleinere Bäche wie der Seitenarm des Hubbachs, Bach Nr. 3 und der Döltschibach vergleichsweise wenige Arten enthalten.

Unterschiede in der faunistischen Zusammensetzung von Bächen lassen sich meist nicht in einfacher Weise erklären, wie das Beispiel Stöckentobelbach/Wehrenbach zeigt. Obwohl beide von der Struktur her ähnlich sind, hat letzterer weniger Arten, wobei die geringere Artenzahl der Steinfliegen besonders auffällt. Möglicherweise spielt die Wasserqualität eine Rolle, wie beim Leimbach, dessen Wasser im Vergleich mit anderen Waldbächen relativ nährstoffreich ist. Dort wurden denn auch nur drei Steinfliegenarten gefunden. Ihre an kühlere Bäche gebundene Lebensweise erklärt hingegen das Fehlen von Steinfliegen im Katzenbach. Die beiden neuen Fundorte (Wisbach, Läufebach) von Larvenhabitaten der Gestreiften Quelljungfer *(Cordulegaster bidentatus)* unterstreichen die Bedeutung kleiner Bäche für die Erhaltung einer in der Schweiz bedrohten Art. Erfreulich ist auch das Vorkommen des

im Kanton Zürich meist in Seen und Seenausflüssen auftretenden Edelkrebses *(Astacus astacus)* im Sagentobelbach. Er ist wohl von der Glatt her eingewandert.

Tabelle 3 Die Fauna in den zehn untersuchten Bächen. Die Nummern bezeichnen die folgenden Bäche: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach. Für Eintags-, Stein- und Köcherfliegen sind die jeweiligen Artenzahlen angegeben.

Table 3 Fauna list of ten selected streams with species numbers of mayflies, stoneflies and caddisflies. Numbers on the first line indicate the following streams: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach.

TAXA	Bach	Nr.								
	12	3	70	64	11	67	25	77	65	34
INSECTA										
Ephemeroptera	6	6	5	2	5	6	3	7	2	2
Plecoptera	14	10	8	2	3	5	3	5	1	0
Trichoptera	18	16	9	12	20	14	16	11	8	19
Elmis sp.							•	•		
Agabus guttatus (Payk.)								•	•	
Agabus didymus (Ol.)										•
Brychius elevatus (Panzer)										•
Neohaliplus lineatocollis Marsham										•
Liaphlus flavicollis Sturm										•
Calopteryx splendens (Harris)										•
Platycnemis pennipes (Pallas)										•
Pyrrhosoma nymphula (Sulzer)										•
Ischnura elegans (Vander Linden)										•
Cordulegaster bidentatus (Selys)					•	•		•		
Libellula fulva (Müller)										•
Osmilus fulvicephalus (Scopoli)	•	•					•			
Velia caprai Tamanini	•	•	•			•	•	•	•	•
CRUSTACEA										
Gammarus fossarum Koch	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Gammarus pulex (L.)										•
Asellus aquaticus L.										•
TURBELLARIA										
Dugesia gonocephala (Dug.)	•				•	•	•			
Dugesia eugubris/polychroa										•
Crenobia alpina (Dana)								•		
Polycelis felina (Dalyell)		•								
Polycelis nigra (Müller)										•
HIRUDINEA										
Glossiphonia complanata (L.)										•
Helobdella stagnalis (L.)										•
Erpobdella octoculata (L.)										•
MOLLUSCA										
Pisidium sp.					•		•		•	•
Sphaerium sp.										•

TAXA	Bach	Nr.								
Ancylus fluviatilis Müller										•
Radix peregra (O.F. Müller)										•
Lymnaea stagnalis (L.)										•
Lymnaea truncatula O.F. Müller								•	•	
Gyraulus albus (O.F. Müller)										•
Planorbis carinatus (O.F. Müller)										•
Bithynia tentaculata (L.)										•
Valvata piscinalis (O.F. Müller)										•
Total Arten	42	36	24	17	32	29	28	30	16	47

In den folgenden Kapiteln wird auf einzelne Tiergruppen näher eingegangen und wo möglich versucht, die heutige Fauna mit den früheren Funden zu vergleichen.

4.1 Eintagsfliegen

Da in der Taxonomie der Eintagsfliegen noch etliche Unklarheiten bestehen, konnten nicht alle Tiere bis auf die Art bestimmt werden. Von den in der Schweiz bisher nachgewiesenen 91 Arten (M. Sartori, 1988) sind in den Bächen der Stadt 12 Taxa gefunden worden (Tabelle 4). Die grösste Diversität ergab sich in Bächen mit hoher Strukturvielfalt.

Mit Ausnahme von *Ephemera danica* (Wehrenbach), deren Larve eingegraben im Gewässergrund lebt, bevorzugen die meisten Arten Bäche mit einer steinigen Bachsohle. An stark strömenden Stellen findet man dort häufig unter grösseren Steinen verborgen die Larven von *Rhitrogena semicolorata*. *Ephemerella ignita* ist in kleineren Bächen nur dann anzutreffen, wenn die Bachsohle bewachsen ist. Das am Höcklerbach gefangene Exemplar dürfte von der Sihl zugeflogen sein, dessen mit Algen bewachsenes Bett zahlreichen Larven Nahrung und Unterschlupf bietet. Fast überall wurde *Baetis rhodani* gefunden, eine in der ganzen Schweiz häufige und wenig anspruchsvolle Art. Daneben kommen auch Arten vor, die, wie *Baetis alpinus* (Döltschibach, Läufebach, Höcklerbach), *B. muticus* (dito, Wisbach) und *Electrogena cf. gridelli* (Seitenarm Hubbach, Wisbach, Läufebach, Höcklerbach, Bach Nr. 3) im kühleren Wasser von Waldbächen oder in Oberläufen leben. Erstmals nachgewiesen im Kanton Zürich wurde *Baetis scambus* und *Ecdyonurus helveticus*. Letztere ist auf Stadtgebiet an mehreren Waldbächen (Stöckentobelbach, Wehrenbach, Döltschibach, Läufebach) anzutreffen. Sie kommt im Gegensatz zu *E. venosus* in sauerstoffreichen und kälteren Bächen vor. Im Kanton Genf konnte sie seit der letzten Erhebung (M. Sartori und M. Dethier, 1985) nicht mehr nachgewiesen werden (M. Sartori, mündliche Mitteilung). Interessant ist das Vorkommen von *Baetis scambus* im Katzenbach. Die Art ist in der Schweiz relativ selten. Sie wurde bisher nur in wenigen, mittelgrossen Flüssen gefunden und steht auf der Roten Liste der gefährdeten Arten (M. Sartori, 1987).

belle 4 Liste der Eintagsfliegen. Die Nummern bezeichnen die folgenden Bäche: 12 Stöcken- ›elbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufe- ch; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach.
e mit «RL» bezeichnete Kolonne enthält Angaben zum Gefährdungsgrad nach M. Sartori '87): 2 bedeutet stark gefährdet, 3 gefährdet.

ble 4 Species list of mayflies captured in ten selected streams. Numbers on the first line in- :ate the following streams: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seiten- n des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; Katzenbach.
:L» stands for «Red list» after M. Sartori (1987): 2 = vulnerable, 3 = threatened.

ɩTEN	Bach	Nr.									RL
	12	3	70	64	11	67	25	77	65	34	
ETIDAE											
etis sp.									•		
alpinus Pictet			•			•		•			
muticus L.			•		•	•		•			
rhodani Pictet	•	•		•	•		•	•		•	
scambus Eaton										•	3
:PTAGENIIDAE											
dyonurus cf. venosus F.	•	•					•				
helveticus (Eaton)	•	•	•			•					
ctrogena cf. gridellii Grandi				•	•	•		•	•		2
itrogena cf. semicolorata (Curt.)	•	•	•		•	•	•	•			
'HEMERELLIDAE											
hemerella ignita (Poda)								•			
:PTOPHLEBIIDAE											
ibroleptoides confusa Sartori & Jacob	•	•	•		•	•	•	•			
ibrophlebia lauta Eaton	•										
'HEMERIDAE											
ıhemera danica Müller		•									
ıtal Arten	6	6	5	2	5	6	4	7	2	2	

2 Steinfliegen

on der in der Schweiz auf 100 Arten geschätzten Steinfliegenfauna konnten ı Laufe der Untersuchung vierzehn nachgewiesen werden (Tabelle 5). Die einfliegenfauna der zehn intensiver untersuchten Bäche besteht zum gröss- n Teil aus Arten, die in der Schweiz weit verbreitet und häufig sind. Eine usnahme ist *Leuctra prima* (Stöckentobelbach, Döltschibach, Läufebach, öcklerbach), die in der Zentralschweiz nicht nachgewiesen werden konnte . Aubert, 1985) und in der Westschweiz selten ist (J. Aubert, Manuskript in ›rbereitung). Die Imagines dieser Art sind bereits im Januar auf dem Schnee ızutreffen. Bemerkenswert ist das Vorkommen von *Leuctra cingu*

kentobelbach, Wehrenbach, Döltschibach), einer euryöken, nach J. Illies (1978) einer für das Alpengebiet endemischen Art.

Die Artenzusammensetzung in den untersuchten Bächen ist charakteristisch für kleinere Fliessgewässer und wird von den sich vegetabilisch ernährenden Vertretern der Familie der Filipalpia dominiert. Einziger Vertreter der carnivoren Setipalpia ist *Isoperla grammatica*, eine weit verbreitete und häufige Art. Die grösste Artenvielfalt findet man in Tobelbächen, die den an kühles Wasser angepassten Steinfliegen optimale Lebensbedingungen bieten. Einzig *Nemoura marginata* kann kleinste Rinnsale besiedeln, weshalb sie auch in kleineren Bächen wie dem Seitenarm des Hubbachs und dem Bach Nr. 3 vorkommt. Keine Steinfliegen hingegen wurden im Katzenbach beobachtet.

Zwischen 1881 und 1920 wurden im Wehrenbach- und Stöckentobel zwanzig Steinfliegenarten nachgewiesen (F. Ris, 1897, 1902, Sammlung ETHZ). Von diesen konnten acht im Verlaufe der Untersuchung bestätigt werden, sechs Arten sind neu dazugekommen (Tabelle 5). Eine völlige Übereinstimmung der Artenlisten hätte überrascht, denn im Vergleich zu Ris konnte viel weniger Zeit für die Suche aufgewendet werden. Auch wenn vermutlich einige Arten aus diesem Grunde übersehen worden sind, ist dies für die auffälligen Arten aus den Familien der Chloroperlidae und Perlidae eher unwahrscheinlich. Ihr Verschwinden hängt möglicherweise mit Veränderungen der Wasserqualität zusammen (J. Aubert, 1984), die zum lokalen Aussterben von Populationen führen kann. Da Steinfliegen ausgesprochen schlechte Flieger sind, ist eine Wiederbesiedlung oft nicht möglich. Von *Perla marginata* ist bekannt, dass sie auch andernorts selten geworden ist (J. Aubert, 1985). Die meisten «fehlenden» Arten sind heute in grösseren Fliessgewässern wie Töss oder Sihl nachgewiesen worden. Ausnahmen sind *Nemoura dubitans*, nach neueren Erkenntnissen eine Art der Moore und Riedgebiete, und *Nemurella picteti*, eine euryöke Art, die auch stehende Gewässer besiedelt. *Leuctra alpina*, *L. mayor* und *Capnia bifrons* hingegen konnten im Kanton Zürich seit Ris nicht mehr nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu kommt in der West- und Zentralschweiz *L. alpina* sehr häufig vor, während *Capnia nigra* und *Leuctra major* selten sind (J. Aubert, 1985; J. Aubert, Manuskript in Vorbereitung).

Von den sechs erstmals im Wehrenbach und Stöckentobel nachgewiesenen Arten ist eine (*Leuctra pseudosignifera*) erst in diesem Jahrhundert beschrieben worden, drei weitere (*Leuctra prima*, *L. leptogaster*, *Protonemura nitida*) hat Ris andernorts im Kanton Zürich nachgewiesen. Diese drei und *Leuctra cingulata* kommen heute relativ selten in den beiden Tobelbächen vor. *L. leptogaster* gilt in Deutschland als eine vom Aussterben bedrohte Art (P. Zwick, 1984). Weit häufiger ist dagegen *Leuctra handlirschi*, eine in der Schweiz weit verbreitete und schmutzwassertolerante Art (J. Aubert, Manuskript in Vorbereitung). Womit der vermutete Wandel im Artenspektrum zusammenhängt, bleibt ohne genauere Untersuchung ungewiss.

Tabelle 5 Artenliste der Steinfliegen. Die Nummern bezeichnen die folgenden Bäche: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach.
In der Kolonne «Ris» sind die von F. Ris zwischen 1881 und 1920 im Stöckentobel- und Wehrenbach nachgewiesenen Arten aufgeführt. Die mit «RL» bezeichnete Kolonne enthält Angaben zum Gefährdungsgrad nach P. Zwick (1984): 1 bedeutet vom Aussterben bedroht, 2 stark gefährdet.

Table 5 Species list of stoneflies captured in ten selected streams. Numbers on the first line indicate the following streams: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach.
Species indicated in the column «Ris» were collected between 1881 and 1920 by F. Ris in the Stöckentobel- and Wehrenbach. «RL» stands for «Red list» after P. Zwick (1984): 1 = endangered, 2 = vulnerable.

ARTEN	Ris	Bach Nr.										RL
		12	3	70	64	11	67	25	77	65	34	
TAENIOPTERYGIDAE												
Brachyptera risi (Morton)	•	•	•				•	•	•			
NEMOURIDAE												
Protonemura sp.							•	•				
P. intricata (Ris)	•	•	•						•			
P. nitida (Pictet)		•		•								
P. praecox (Morton)	•	•										
P. risi Jacobson & Bianchi	•	•			•	•						
Amphinemura sulcicollis (Stephens)	•											
A. triangularis (Ris)	•											
Nemoura sp.				•								
N. cinerea (Retzius)	•											
N. dubitans Morton	•											
N. flexuosa Aubert	•											
N. marginata Pictet	•	•	•		•	•	•	•	•	•		
Nemurella picteti Klapálek	•											
LEUCTRIDAE												
Leuctra major Brinck	•											
L. albida Kempny	•	•	•									
L. alpina Kühtreiber	•											
L. cingulata Kempny		•	•	•								
L. handlirschi Kempny		•	•	•								
L. hippopus Kempny	•	•	•	•								
L. leptogaster Aubert		•	•	•								1
L. pseudosignifera Aubert		•										
L. prima Kempny		•		•			•		•			
CAPNIIDAE												
Capnia nigra (Pictet)	•											

ARTEN	Ris	Bach	Nr.									RL
C. bifrons (Newman)	•											
PERLODIDAE												
Isoperla grammatica (Poda)	•	•	•	•		•	•		•			
CHLOROPERLIDAE												
Siphonoperla torrentium (Pictet)	•											
PERLIDAE												
Perla marginata (Panzer)	•											2
Total Arten	20	14	9	8	2	3	5	3	5	1	0	

4.3 Köcherfliegen

Da die Larven in den wenigsten Fällen sicher bis auf die Art bestimmt werden können, wurden zur Ergänzung Imagines mit Lichtfallen gefangen. Die vorgefundene Artenvielfalt kann aber nur beschränkt dem betreffenden Gewässer zugeschrieben werden, weil Köcherfliegen weit umherstreifen können. Dies hat zur Folge, dass man an Bächen auch Arten findet, die sich in kleineren Nebenbächen oder gar fernab davon in grösseren Flüssen oder stehenden Gewässern entwickelt haben. Ein Beispiel hierfür ist das am Uetliberg gefangene Individuum der Art *Neureclipsis bimaculata*, die als Larve in Seenausflüssen wie der Limmat lebt.

Von der in der Schweiz auf 267 Arten geschätzten Fauna (W. Sauter, schriftliche Mitteilung) konnten 48 auf Stadtgebiet nachgewiesen werden (Tabelle 6). Über Vorkommen und Verbreitung der Köcherfliegen in der Schweiz ist nur wenig bekannt. Genaueres weiss man bis heute nur von den Rhyacophila-Arten (H. Buholzer, 1978). Der Schwerpunkt ihrer Verbreitung liegt in der montanen und subalpinen Stufe. Von den vier in Zürich vorkommenden Arten sind die beiden euryöken Arten *Rhyacophila dorsalis* und *R. vulgaris* in der Schweiz weit verbreitet und häufig. Die in Quellbächen vorkommenden Arten wie *R. pubescens* und *R. hirticornis* dagegen sowie *R. fasciata* sind eher lokal verbreitet und nur im zentralen Mittelland heimisch. Ein Vergleich mit dem sich in Bearbeitung befindenden Verbreitungsatlas der Westschweizer Köcherfliegen (C. Siegenthaler, schriftliche Mitteilung) ergibt folgendes Bild: selten sind dort *Hydropsyche angustipennis*, *Cheumatopsyche lepida*, *Lype reducta* und *Lepidostoma hirtum*, während *Enoicyla reichenbachi*, *Rhyacophila hirticornis* und *Metalype fragilis* nicht nachgewiesen werden konnten.

Vergleicht man die Köcherfliegenfauna der zehn Bäche, unterscheidet sich der Katzenbach deutlich von den kühleren Waldbächen. Mehr als die Hälfte seiner Arten sind an keinem anderen Bach gefangen worden. Es sind dies hauptsächlich Arten grösserer Bäche und Flüsse, aber auch stehender oder langsam fliessender, pflanzenreicher Gewässer, wie sie für das ehemalige Riedgebiet typisch waren. Dazu gehören vornehmlich Arten aus den Familien der Limnephilidae, Phryganeidae und Leptoceridae, die zu einem grossen Teil

aus dem ca. 1 km entfernten Katzenseegebiet zugeflogen sein dürften. Waldbäche dagegen enthalten Arten, die kühles, oft auch sauberes Wasser bevorzugen. Beispiele dazu sind die Vertreter der Philopotamidae, Goeridae, Sericostomatidae, Polycentropodidae (ausgenommen *N. bimaculata*) und Odontoceridae. Dazu gehören Arten wie *Crunoecia irrorata* und *Tinodes unicolor*, deren Larven in Quellen oder an überrieselten Felsen leben.

Bereits im letzten Jahrhundert ist die Köcherfliegenfauna in und um Zürich intensiv erforscht worden (L. R. Meyer-Dür, 1882; F. Ris, 1889, Entomologische Sammlung ETHZ). Man zählte damals 158 Arten auf Stadtgebiet. Die meisten wurden in den Riedgebieten am Bahndamm in Oerlikon und am Katzensee beobachtet, ein kleiner Teil auch an Limmat, Sihl und See. Allein am Wehrenbach und Stöckentobel wurden zwischen 1878 und 1915 zweiundvierzig Arten festgestellt. Heute konnten dort noch dreiundzwanzig Arten nachgewiesen werden. Dreizehn davon sind Bestätigungen alter Funde, zehn Arten sind neu dazugekommen. Abgesehen davon, dass nur in einem Jahr gesammelt werden konnte, ist dieser vermeintliche Artenrückgang vor allem darauf zurückzuführen, dass ausschliesslich den Bächen entlang gesammelt worden ist. Damit konnten die von Ris vermutlich in Hangsümpfen und Quellaufstössen gefangenen Arten (ca. 12) nur schlecht erfasst werden und fehlen grösstenteils in der aktuellen Artenliste der beiden Tobelbäche. Fünfzehn der 42 von Ris festgestellten Arten konnten allerdings auch andernorts im Kanton Zürich (noch) nicht nachgewiesen werden. Auf einen Wandel im Artenspektrum der beiden Tobelbäche deuten vor allem die neu nachgewiesenen Arten hin, von denen die Hälfte *(Hydroptila forcipata, Hydropsyche instabilis, H. siltalai, Rhyacophila dorsalis, Psychomyia pusilla)* euryöke, weit verbreitete Arten sind, die man auch in grösseren Bächen und Flüssen findet.

Tabelle 6 Artenliste der Köcherfliegen. Die Nummern bezeichnen die folgenden Bäche: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach.
In der Kolonne «Ris» sind die von F. Ris zwischen 1878 und 1915 im Stöckentobel- und Wehrenbach nachgewiesenen Arten aufgeführt. Die Kolonne «RL» enthält Angaben zum Gefährdungsgrad nach D. Tobias und W. Tobias et al. (1984): 2 bedeutet stark gefährdet, 3 gefährdet, 4 potentiell gefährdet.

Table 6 Species list of caddisflies captured in ten selected streams. Numbers on the first line indicate the following streams: 12 Stöckentobelbach; 3 Wehrenbach; 70 Döltschibach; 64 Seitenarm des Hubbachs; 11 Wisbach; 67 Läufebach; 25 Leimbach; 77 Höcklerbach; 65 Bach Nr. 3; 34 Katzenbach.
Species indicated in the column «Ris» were collected between 1878 and 1915 by F. Ris in the Stöckentobel- and Wehrenbach. «RL» stands for «Red list» after D. Tobias and W. Tobias et al. (1984): 2 = vulnerable, 3 = threatened, 4 = not threatened.

ARTEN	Ris	Bach	Nr.									RL
		12	3	70	64	11	67	25	77	65	34	
RHYACOPHILIDAE												
Rhyacophila dorsalis (Curt.)			•								•	
R. fasciata Hagen								•				
R. hirticornis McLachlan						•						4

ARTEN	Ris	Bach	Nr.									RL
R. pubescens Pictet	•	•		•		•	•					4
R. vulgaris Pictet	•	•	•		•			•	•			
GLOSSOSOMATIDAE												
Glossosoma boltoni Curtis											•	
HYDROPTILIDAE												
Allotrichia pallicornis (Eaton)					•							2
Hydroptila forcipata (Eaton)			•									
Orthotrichia sp.											•	
PHILOPOTAMIDAE												
Wormaldia occipitalis (Pictet)	•	•				•						
Philopotamus variegatus (Scopoli)	•	•	•	•	•		•	•				
HYDROPSYCHIDAE												
Hydropsyche angustipennis (Curt.)											•	
H. contubernalis McLachlan					•	•	•	•	•	•	•	
H. instabilis (Curt.)		•	•			•		•		•	•	
H. pellucidula (Curt.)									•			
H. siltalai Döhler		•	•	•		•	•	•	•		•	
H. tenuis Navas	•	•										2
Cheumatopsyche lepida (Pictet)											•	3
POLYCENTROPODIDAE												
Plectrocnemia brevis McLachlan	•		•	•	•	•		•		•		2
P. conspersa Curtis	•	•	•	•	•	•	•		•		•	
P. geniculata McLachlan	•	•	•	•	•	•	•	•	•			4
Neureclipsis bimaculata (L.)					•							4
PSYCHOMYIDAE												
Tinodes unicolor (Pictet)	•	•	•					•				
T. waeneri (L.)											•	
Psychomyia pusilla (Fabr.)		•		•	•		•		•	•	•	
Lype reducta (Hagen)		•				•						
L. phaeopa (Stephens)											•	
Metalype fragilis (Pictet)		•	•			•	•		•			3
PHRYGANEIDAE												
Agrypnia varia (Fabr.)											•	
LIMNEPHILIDAE												
Micropterna sequax McLachlan		•			•	•		•	•			
Potamophylax cingulatus (Stephens)		•	•	•			•	•				
P. nigricornis (Pictet)						•		•		•		
Glyphotaelius pellucidus (Retzius)	•		•				•	•				
Enoicyla reichenbachi (Kolenati)		•					•					3
Limnephilus auricula Curtis						•						
L. decipiens (Kolenati)						•						
L. extricatus McLachlan											•	
L. flavicornis (Fabr.)						•						
L. rhombicus (L.)										•	•	
GOERIDAE												
Goera pilosa											•	
Silo nigricornis (Pictet)						•						4
LEPIDOSTOMATIDAE												
Crunoecia irrorata (Curtis)	•		•		•							
Lepidostoma hirtum (Fabr.)						•		•	•	•		
LEPTOCERIDAE												
Ceraclea dissimilis (Stephens)					•		•				•	
Setodes punctatus (Fabricius)											•	2
Mystacides azurea (L.)											•	
SERICOSTOMATIDAE												
Sericostoma sp.	•	•	•			•	•	•	•	•		
ODONTOCERIDAE												
Odontocerum albicorne (Scopoli)	•	•	•	•		•	•	•				
Total Arten		18	16	9	12	20	14	16	11	8	19	

5 Flora

Bei der Begehung der Bäche wurden die im unmittelbaren Gewässerbereich lebenden Blütenpflanzen, mit Ausnahme der Gräser, notiert. Auf Stadtgebiet konnten insgesamt siebzehn Wasserpflanzenarten nachgewiesen werden (Tabelle 7). Die häufigste Art, die auch in Wäldern an lichten Stellen gut gedeiht, ist die Bachbunge oder der Bach-Ehrenpreis *(Veronica beccabunga)*. Sie besiedelt als Pionierpflanze Quellfluren oder den Verlandungsbereich fliessender Gewässer und bildet dort meist grössere Bestände. Alle anderen Arten sind in bezug auf Licht und Wassertiefe anspruchsvoller, weshalb man

Tabelle 7 Liste der Wasser- und Sumpfpflanzen. Die Nummern bezeichnen die in Tabelle 1 aufgeführten Bäche. Die artenreichsten sind: 24 Sagentobelbach, 34 Katzenbach, 38 Eichriedgraben, 39 Mittelgraben, 40 Dorfbach Affoltern.
In der mit «Egloff» bezeichneten Kolonne stehen Arten, die 1972 von F. Egloff am Katzen- und/oder Dorfbach Affoltern gefunden worden sind (F. Egloff, unveröffentl. Bericht, Amt für Raumplanung, Kanton Zürich).

Table 7 Species list of waterweeds. Numbers indicate streams from table 1. The most important streams with respect to diversity or density of aquatic plants are: 24 Sagentobelbach, 34 Katzenbach, 38 Eichriedgraben, 39 Mittelgraben, 40 Dorfbach Affoltern.
The species indicated in the column «Egloff» were found by F. Egloff in 1972 in the Katzenbach and/or Dorfbach Affoltern (unpublished report, Amt für Raumplanung, Kanton Zürich).

ARTEN	Egloff	Bach Nr.
Emerse Wasserpflanzen		
Alisma plantago-aquatica L. (Froschlöffel)	•	34, 39
Berlula erecta Huds. (Wassersellerie)	•	24, 34
Iris pseudacorus L. (Gelbe Schwertlilie)	•	24, 34, 63
Nasturtium officinalis L. (Brunnenkresse)	•	33, 34, 38, 39, 40, 54, 56, 82
Phragmites communis Trin. (Schilf)	•	10, 34, 38, 39, 40
Polygonum bistorta L. (Schlangenknöterich)		40
Sparganium ramosum Huds. (Igelkolben)	•	24, 34
Veronica anagallis-aquatica L. (Ufer-Ehrenpreis)	•	24, 26, 34, 38, 72
Veronica beccabunga L. (Bachbunge)	•	1, 15, 16, 20, 22, 24, 25, 26, 34, 37, 47, 50, 52, 53, 62, 63, 65, 68, 71, 72, 74, 75, 77, 80, 81, 82
Submerse Wasserpflanzen		
Callitriche sp. (Wasserstern)	•	34, 39
Elodea canadensis Michx. (Wasserpest)	•	34
Lemna sp. (Wasserlinsen)		39
Myriophyllum spicatum L. (Ähriges Tausendblatt)		34, 40
Polygonum amphibium L. (Wasserknöterich)	•	34, 40
Potamogeton crispus L. (Krauses Laichkraut)	•	24, 34, 40
P. densus L. (Dichtblättriges Laichkraut)	•	24, 34
P. pusillus L. (Kleines Laichkraut)	•	34

sie auf Stadtgebiet nur in wenigen Bächen finden kann. Katzenbach, Dorfbach Affoltern und der unterste Abschnitt des Sagentobelbachs enthalten die bedeutendsten Wasserpflanzenvorkommen auf Stadtgebiet. In ihnen findet man neben Ufer- und Sumpfpflanzen dichte Bestände von submersen Wasserpflanzen. Im Katzenbach allein wachsen vierzehn Arten. Dominierend sind dort Verzweigter Igelkolben *(Sparganium ramosum)* und Krauses Laichkraut *(Potamogeton crispus)* während Ähriges Tausendblatt *(Myriophyllum spicatum)*, Wasserpest *(Elodea canadensis)*, Dichtblättriges *(Potamogeton densus)* und Kleines Laichkraut *(Potamogeton pusillus)* weniger häufig vorkommen. Die meisten Arten sind bekannt dafür, dass sie in nährstoffreichen Gewässern grosse Bestände bilden können. Mit Ausnahme des Wasserselleries *(Berula erecta)* und des Dichtblättrigen Laichkrautes sind alle nachgewiesenen Arten im Kanton Zürich häufig bis sehr häufig (F. Egloff, 1977).

Ein Vergleich mit dem Inventar von F. Egloff, der 1972 an Katzenbach und Dorfbach die Wasserpflanzen kartiert hatte (F. Egloff, unveröffentlichter Bericht, Amt für Raumplanung, Kanton Zürich), zeigt, dass sich die Artenzusammensetzung in den beiden Bächen wenig verändert hat. Neu gefunden wurden das Ährige Tausendblatt und der Schlangenknöterich *(Polygonum bistorta)*, während das Schwimmende Laichkraut *(Potamogeton natans)* nicht mehr nachgewiesen werden konnte.

6 Ökologische Beurteilung der Stadtzürcher Bäche

Im Hinblick auf die Ausscheidung kommunaler Schutzobjekte drängte sich eine Bewertung der inventarisierten Bäche auf. Neben der Gewässergüte ist vor allem die Gewässermorphologie ökologisch bedeutsam. Beide bestimmen die Qualität eines Fliessgewässers als Lebensraum für Fauna und Flora. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass kleinere Bäche faunistisch weniger reichhaltig sind als grosse. Die ausgewählten Bewertungskriterien umfassen die faunistische/floristische Vielfalt, entsprechend dem jeweiligen Bachtyp, das Vorkommen gefährdeter Tier-/Pflanzenarten, die Strukturvielfalt im Sohlen- und Uferbereich sowie die Gewässergüte. Als Orientierungshilfe für allfällige Massnahmen wird das Entwicklungspotential des Baches in die Bewertung einbezogen. Die Beurteilung wurde nach folgender Einteilung vorgenommen:

A: Natürlicher Bach/Bachabschnitt, ökologisch weitgehend intakt.

Linienführung und Profil entsprechen den naturräumlichen Gegebenheiten. Natürliche Elemente mit Flach- und Tiefwasserzonen und unterschiedlichen Sohlensubstraten prägen den Bach. Bauliche Massnahmen beschränken sich auf kurze Abschnitte. Querbauten beeinträchtigen die Umlagerung von Sohlensubstraten nicht, so dass die Bildung von Verlandungszonen und Kolken

möglich ist. Fauna und Flora entsprechen dem Bachtyp; es können gefährdete oder seltene Arten (*) vorkommen.

In diese Kategorie fallen schützenswerte Bäche oder Bachabschnitte.

B: Naturnaher Bach/Bachabschnitt, ökologisch beeinträchtigt.

Natürliche Abschnitte wechseln mit solchen, die einen Eingriff des Menschen deutlich erkennen lassen. In der Regel ist das Längsprofil verändert, so dass keine ausreichende Materialumlagerung erfolgt. Die Durchgängigkeit für Bachtiere ist durch Sohlabstürze behindert. Die Uferbereiche können über längere Strecken verbaut sein, so dass der amphibische Bereich fehlt. Die Fauna ist – je nach Verbauungsgrad – mässig bis wenig vielfältig, teilweise auch individuenarm.

Das Entwicklungspotential ist in der Regel relativ gross, eine Revitalisierung wäre in den meisten Fällen lohnenswert.

C: Stark veränderter Bach/Bachabschnitt, ökologisch gestört.

Hierzu zählen zwei Bachtypen: Bei den einen fehlen natürliche Abschnitte weitgehend – die Eingriffe des Menschen überwiegen, bei den anderen handelt es sich um kleinere, meist natürliche Bäche, deren hydrologisches Regime gestört ist, oder um kleinere Restgewässer ohne Verbindung zu anderen Bächen. Gemessen am Potential enthalten sie in der Regel eine artenarme Fauna.

Es sind folgende Ursachen zu verzeichnen: Sohlen- und Ufersicherung (Cs); längere Eindolungsstrecken (Ce), die zur Isolation des Gewässers führen; mangelnde oder unsachgemässe Unterhaltsmassnahmen (Cu), Einleitung von Abwässern aus Sportanlagen oder Einschwemmen von Nährstoffen aus landwirtschaftlich intensiv bewirtschafteten Flächen (Ca); gestörtes hydrologisches Regime (Ch).

Das Entwicklungspotential ist in den meisten Fällen eher gering, es bliebe einer Detailabklärung vorbehalten, ob sich eine Revitalisierung lohnt.

Bild 2 zeigt, dass von den 84 untersuchten Bächen die Mehrzahl ökologisch beeinträchtigt (Kategorie B: 14 Bäche/Bachabschnitte) oder ökologisch gestört (Kategorie C: 56 Bäche/Bachabschnitte) ist. Lediglich achtzehn können als ökologisch einigermassen intakt (Kategorie A) angesehen werden. Fünf von ihnen erfüllen die dazu notwendigen Kriterien nur abschnittweise. Die betreffenden Bäche befinden sich hauptsächlich in den Quartieren Hottingen, Hirslanden, Witikon und Schwamendingen. In dieser Region fliessen auch die beiden einzigen grösseren Bäche, Wehrenbach und Stöckentobelbach, die zusammen das grösste noch intakte Fliessgewässersystem der Stadt bilden. Am Üetliberg hingegen gibt es in dieser Kategorie nur ein paar wenige, kleinere Bäche oder Bachabschnitte. Alle grösseren Bäche sind in der Regel mit hohen Abstürzen verbaut, die eine ausreichende Materialumlage-

rung verhindern. Die fehlende Fliessdynamik, zusammen mit dem strukturarmen Bachbett lassen eine nur begrenzt vielfältige Lebensgemeinschaft zu, die häufig auffallend individuenarm ist. Bei ein paar wenigen Bächen ist zudem das hydrologische Regime gestört, was vermutlich auf die zahlreichen Wasserfassungen in deren Einzugsgebiet zurückzuführen ist.

Keine natürlichen Bäche findet man in den dicht besiedelten Stadtquartieren Seebach, Affoltern, Altstetten, Höngg und Oerlikon. Hier sind die meisten Bäche als Folge baulicher Massnahmen oder aus hydrologischen Gründen ökologisch beeinträchtigt oder gestört. Von vielen Bächen sind nur noch relativ kurze Abschnitte übriggeblieben, was die Entwicklung einer reichhaltigen Lebewelt a priori erschwert und mangels Verbindung zu anderen Bächen auch verunmöglicht. Einen Spezialfall stellt der Katzenbach dar. Er ist der einzige grössere Wiesenbach auf Stadtgebiet, der trotz Begradigung und einer stellenweisen, mässigen Gewässerbelastung eine relativ reiche Fauna und – als einziger – auch grössere Wasserpflanzenbestände enthält.

7 Literatur

Aubert J. (1984): L'Atlas des Plécoptères de Suisse – Influence de la pollution. Annls. Limnol. *20* (1–2): 17–20.

Aubert J. (1985): Les Plécoptères du Napf et des Préalpes de Lucerne et d'Unterwalden (Plecoptera). Ent. Ber. Luzern *14:* 93–111 und *15:* 17–26.

Buholzer H. (1978): Larvenmorphologie und Verbreitung der schweizerischen Rhyacophila-Arten (Trichoptera, Rhyacophilidae). Dissertation ETH Zürich: p. 151.

Egloff F. (1977): Wasserpflanzen des Kantons Zürich. Vjschr. Natf. Ges. Zürich *122* (1): 1–140.

Hagen H.A. (1865): Phryganiden der Umgegend von Zürich nach Bremi's Mittheilung. Entomol. Zeitung Stettin. 26. Jahrg.: 222–233.

Illies J. (Hrsg.) (1978): Limnofauna Europaéa. Fischer Stuttgart & New York: p. 532.

Meier C. (1989): Die Libellen der Kantone Zürich und Schaffhausen. Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen Nr. 41.

Meyer-Dür L.R. (1882): Neuroptera Trichoptera Helvetiae. Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *6:* 301–333.

Ris F. (1889): Beiträge zur Kenntnis der schweizerischen Trichopteren. Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *8:* 102–145.

Ris F. (1897): Neuropterologischer Sammelbericht 1894–1896. Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *9*.

Ris F. (1902): Die schweizerischen Arten der Perlidengattung Nemura. Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *10:* 378–405.

Sartori M. (1987): Contribution à l'étude taxonomique et ecofaunistique des Ephéméroptères de Suisse (Insecta, Ephemeroptera). Thèse de doctorat. Univ. Lausanne. 1–561.

Sartori M. (1988): Quelques compléments à la faune des Ephéméroptères de Suisse (Insecta, Ephemeroptera). Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *61:* 339–347.

Sartori M. und Dethier M. (1985): Faune aquatique du canton de Genève: II. Ephéméroptères (Insecta, Ephemeroptera). Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *58:* 493–510.

Tobias D. und Tobias W. et al. (1984): in Blab J., E. Nowak, W. Trautmann, H. Sukopp (Hrsg.): Rote Liste der gefährdeten Tiere und Pflanzen in der Bundesrepublik Deutschland, Naturschutz aktuell 1, 4. Aufl. Greven Kilda Verlag: 67–69.

Zwick P. (1984): in Blab J., E. Nowak, W. Trautmann, H. Sukopp (Hrsg.): Rote Liste der gefährdeten Tiere und Pflanzen in der Bundesrepublik Deutschland. Naturschutz aktuell 1, 4. Aufl. Greven Kilda Verlag: 115–116.

Dr. V. Lubini-Ferlin, Eichhalde 14, 8053 Zürich

rteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1989) *134*/4: 251–280

eutrinophysik und Supernova-Explosionen[1]

rbert Straumann, Universität Zürich

Am Ende der thermonuklearen Evolution eines massiven Sterns wird der sgebrannte zentrale Bereich instabil und stürzt in fast freiem Fall in sich sammen. Dabei entsteht ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Die sseren Teile des Ausgangssterns können unter Umständen durch eine waltige Schockwelle abgestossen werden. Dieses kosmische Feuerwerk scheint uns dann als Supernova. Der weitaus überwiegende Teil der beim llaps freigesetzten Energie wird aber in einem gewaltigen Neutrinopuls gestrahlt. Diese Neutrinostrahlung wurde anlässlich der Supernova-Explon 1987A in der Grossen Magellanschen Wolke in Untergrundlaboratorien tmals nachgewiesen. Damit konnten unsere theoretischen Vorstellungen er den Gravitationskollaps und die Bildung von Neutronensternen quantiiv überprüft werden. Detaillierte Beobachtungen der weiteren Entwicklung n SN 1987A bei allen Wellenlängen sind von unschätzbarem Wert für das ıdium der Sternevolution, der Nukleosynthese und der physikalischen Prosse bei der Geburt eines Neutronensterns. Die Supernova 1987A in der ossen Magellanschen Wolke wird noch für viele Jahre ein Brennpunkt der rophysikalischen Forschung sein.

utrinophysics and Supernova Explosions

the end of the thermonuclear evolution of a massive star the burned out ntral region becomes unstable and collapses in almost free fall. Thereby a utron star or a black hole is formed. The exterior parts of the progenitor r may, under certain circumstances, be expelled by a powerful shock wave. is cosmic firework appears then as a supernova. By far the largest part of energy released in the collapse is, however, radiated away in a gigantic utrino pulse. This neutrino radiation was the first time detected in underound laboratories a few hours before the supernova SN 1987A flared up in Large Magellanic Cloud. This enabled us to test quantitatively our theotical ideas on gravitational collapse and neutron star formation. Detailed servations of the further evolution of SN 1987A are of unvaluable impornce for the study of stellar evolution, nucleosynthesis, and the physical prosses at the birth of a neutron star. The supernova 1987A in the Large Magelnic Cloud will be a major focus for astrophysical research for many years to me.

[1] Nach einem Vortrag in der Naturforschenden Gesellschaft Zürich am 6. 2. 1989.

1 Einleitung und historische Bemerkungen

Der 23. Februar 1987 wird als ein besonders wichtiges Datum in die Geschichte der Astronomie eingehen. An diesem Tag bemerkten Ian Shelton und Oscar Duhalde am Inter-Amerikanischen Observatorium auf dem Cerro Tololo in Chile und, unabhängig davon, der australische Amateurastronom Albert Jones erstmals die hellste Supernova seit Keplers Tagen.

Bild 1 zeigt eine Aufnahme im ultravioletten Bereich mit dem ESO-1m-Schmidt-Teleskop der uns interessierenden Region der Grossen Magellanschen Wolke aus dem Jahre 1977. In der Mitte sieht man einen etwas ovalen Fleck, der von zwei sehr benachbarten Sternen herrührt, die nur 2,6 Bogensekunden voneinander entfernt sind. Einer der beiden Sterne, Sanduleak-69°202, «ist» ein blauer Superriese (ein OB-Stern der 12. Grösse), der also sehr heiss ist ($\simeq$ 15 000 K). Nichts deutet darauf hin, dass dieser Stern bald sein inneres Gleichgewicht verlieren sollte. Das Bild 2 wurde mit dem gleichen Teleskop etwa zehn Jahre später, am 26. Februar 1987 (01:25 UT), von derselben Gegend gewonnen. Seit dem 23. Februar 1987 – weniger die Lichtlaufzeit von etwa 160 000 Jahren – gibt es den Stern Sanduleak-69°202 nicht mehr.

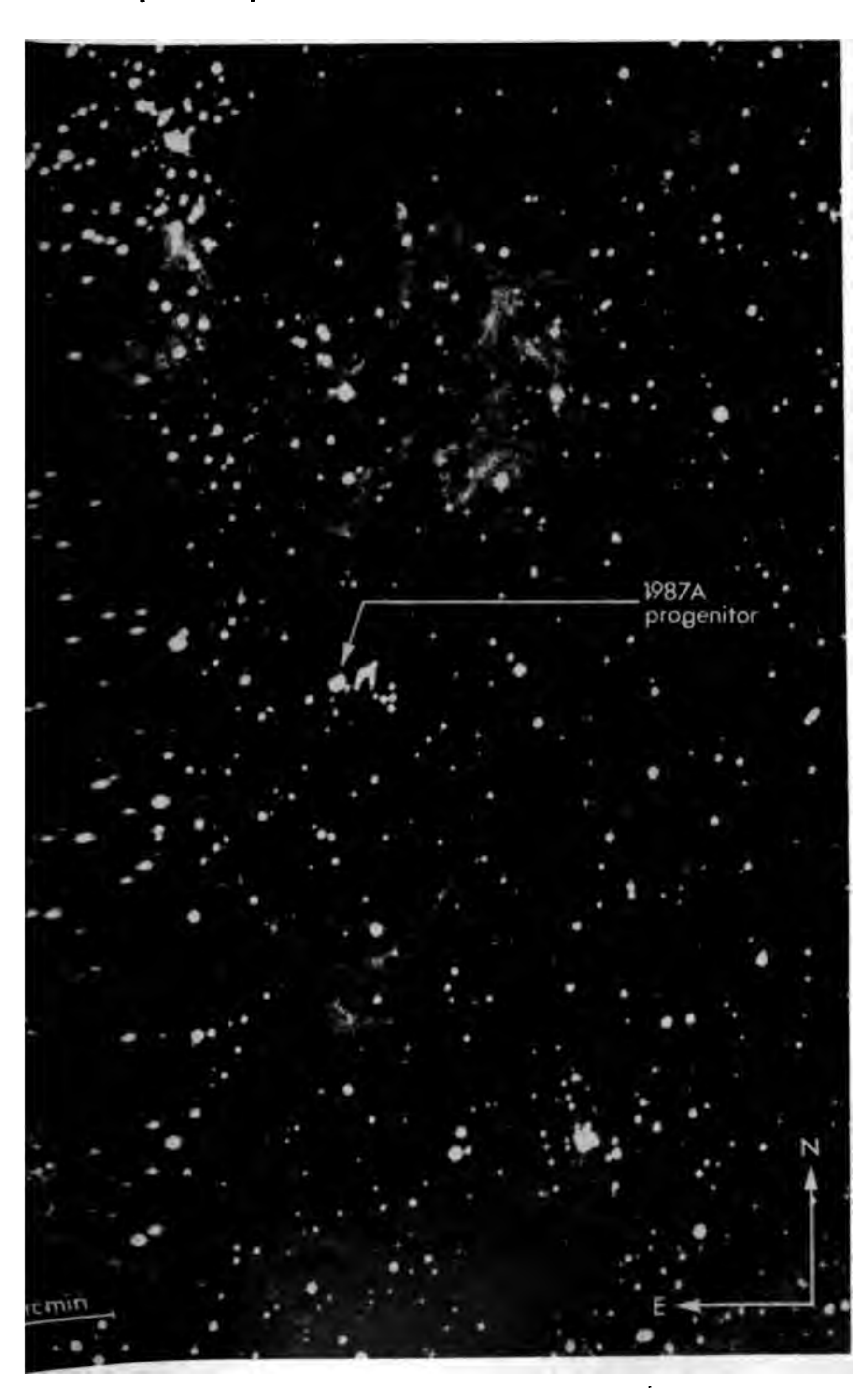
Im Unterschied zu Kepler stand uns diesmal ein hochentwickeltes Instrumentarium zur Verfügung, mit welchem die Entwicklung der Supernova (SN 1987A) in alle Einzelheiten verfolgt werden kann. Erstmals gelang dabei der Nachweis des Neutrinopulses, der erwartungsgemäss beim Sternkollaps entsteht. Dieser erreichte die Erde wenige Stunden vor dem optischen Ausbruch und hat es uns ermöglicht, einen flüchtigen «Blick» in die zentralsten Regionen des Geschehens zu werfen. Damit markiert SN 1987A auch die Geburtsstunde der (extrasolaren) Neutrino-Astronomie.

Kosmische Feuerwerke, bei denen in manchen Fällen mehrere Sonnenmassen mit ungeheurer Wucht abgesprengt werden, haben die Menschen auch in der Vergangenheit sehr bewegt. Dazu ein paar wenige historische Bemerkungen.

In den vergangenen zwei Jahrtausenden wurden mit dem unbewaffneten Auge 8 Neue Sterne von langer Dauer bemerkt, die aufgrund der aufgezeichneten Beobachtungen zweifelsfrei Supernovae waren (D. H. Clark und F. R. Stephenson, 1977). Die Jahrzahlen dieser 8 Ereignisse sind: 185, 386, 393, 1006, 1054, 1181, 1572, 1604. Das hellste war die Supernova von 1006. Sie wurde auch in St. Gallen registriert. Aus den Chroniken des Klosters geht her-

Bild 1 Vorläuferstern Sanduleak-69 202 der Supernova 1987A in der Grossen Magellanschen Wolke. Aufnahme im ultravioletten Licht mit dem ESO-1-m-Schmidt-Teleskop am 9. Dezember 1977.

Fig. 1 Progenitor star Sanduleak-69 202 of supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud. Photograph obtained with the ESO-1-m-Schmidt-telescope in ultraviolet light on December 9, 1977.


1987A
progenitor
N
E
rcmin

1 arc min
N
E

vor, dass der sehr helle Stern, von der Stadt aus gesehen, knapp über dem Alpstein-Massiv erschien. Aufgrund der Beschreibung der Position konnte man vor etwa zehn Jahren mit dem Einstein-Röntgenobservatorium die Überreste dieser historischen Supernova finden. Diese sehen ähnlich aus wie der bekannte Krebsnebel, welcher – wie zuerst Hubble 1928 bemerkte – das Relikt der berühmten Supernova aus dem Jahre 1054 ist, die in den chinesischen Jahrbüchern der Sung-Dynastie genau beschrieben ist[2]. Im Zentrum dieses Überrestes befindet sich ein Pulsar, d. h. ein schnell rotierender Neutronenstern, welcher beim auslösenden Sternzusammenbruch gebildet wurde. Inzwischen kennen wir eine ganze Reihe von ähnlichen Gebilden mit zentralen Radio- oder Röntgenpulsaren.

Sehr berühmt ist auch die Supernova von 1572, mit welcher sich – neben vielen – Tycho Brahe sehr intensiv befasste. Als dieser den Neuen Stern in Cassiopeia das erste Mal bemerkte, war er dermassen erstaunt, dass er seinen Sinnen nicht mehr traute und sich von jedermann versichern liess, dass alle denselben Stern, der so hell war wie die Venus, ebenfalls sahen. Er zeigte mit Hilfe eines grossen neuen Sextanten viel genauer als andere Astronomen, dass der Neue Stern am Himmel feststand, und ordnete ihn deshalb in die achte Sphäre der Fixsterne ein. Dies widersprach nun den Lehren der Aristoteliker, Platoniker und Christen, wonach Wechsel, Geburt und Verfall auf die Nachbarschaft der Erde, sie sublunare Sphäre, beschränkt seien, wogegen die weit entfernte achte Sphäre mit den Fixsternen vom Tage der Schöpfung an bis in alle Ewigkeit unverändert bliebe. (Erörterungen dazu findet man auch in Galileis Dialog über die beiden Weltsysteme.)

Am 31. August 1885 entdeckte der Astronom Hartwig aus Dorpat in Estland eine «Nova» in der Nähe des Zentrums des Andromeda-Nebels. Die Bedeutung dieser Entdeckung wurde erst klar, als Lundmark 1919 die Entfernung zum Andromeda-Nebel ungefähr bestimmen konnte; danach musste die Hartwigsche «Nova» mehrere tausendmal heller gewesen sein als eine normale Nova.

Die Bezeichnung «Supernova» geht auf Fritz Zwicky zurück, der 1934 mit systematischer Supernovaforschung begann und selber 122 extragalaktische Ereignisse entdeckte. Nach der Tychonischen Supernova von 1572 und der Keplerschen Supernova von 1604 im Sternbild Schlangenträger fragt man sich immer noch, zu wessen Ehre diesmal SN 1987 A aufleuchtete.

[2] Es ist merkwürdig, dass die Mönche in St. Gallen, weniger als 50 Jahre nach dem registrierten Ereignis von 1006, die ebenfalls sehr helle Supernova von 1054 nicht mehr zur Kenntnis nah-[illegible]

Bild 2 Aufnahme der Supernova 1987 A im blauen Spektralbereich mit demselben Teleskop am 26. Februar (01:25 UT) 1987. Ausserhalb der hellen Supernova ist die Sternverteilung ähnlich wie in Bild 1.

Fig. 2 Blue photo of the supernova 1987 A with the same telescope on February 26, 1987. Outside the bright supernova the stellar distribution is similar to that in Fig. 1.

In diesem Aufsatz werde ich in groben Zügen die Physik von Typ-II-Supernova-Explosionen beschreiben. Dabei werde ich vor allem die entscheidende Rolle der Neutrinophysik beim Sternkollaps und bei der Bildung eines Neutronensterns betonen. Der epochale Nachweis des Neutrinoausbruchs gibt sehr direkte Informationen über die Entwicklung des beim Sternzusammenbruch entstandenen Protoneutronensterns zu einem Neutronenstern im Verlaufe von etwa 20 Sekunden. Obschon nur wenige Neutrinos in den Detektoren hängengeblieben sind, ist die Zahl der interessanten Schlussfolgerungen beachtlich. (Für eine detailliertere und technischere Darstellung verweisen wir auf N. Straumann [1989]).

2 Eine erste Übersicht der hauptsächlichsten Vorgänge

Bevor wir auf nähere Einzelheiten eingehen, möchte ich zunächst mit wenigen Strichen den Ablauf der wichtigsten Ereignisse beim Untergang eines massereichen Sterns darstellen.

Am Ende ihrer thermonuklearen Evolution entwickeln hinreichend massive Sterne ($\geq 10\,M_{\odot}$) einen ausgebrannten «Eisen-Nickel-Core», welcher schliesslich unvermeidlich instabil wird. Die äusseren Schichten haben einen zwiebelschalenförmigen Aufbau von noch nicht vollprozessiertem Material (Bild 3a). Zum Zeitpunkt der einsetzenden Instabilität hat der zentrale Core etwa die Ausdehnung der Erde, und seine Masse ist nahe bei der Chandrasekhar-Grenze ($\simeq 1{,}4\,M_{\odot}$) für Weisse Zwerge. Typische Werte für die zentrale Temperatur (T_c) und die zentrale Dichte (ϱ_c) sind

$$T_c \simeq 0{,}6-0{,}8\ \mathrm{MeV},\ \varrho_c = \text{einige } 10^9-10^{10}\ \mathrm{g/cm^3}. \tag{1}$$

Da das Gleichgewicht nicht mehr aufrechterhalten werden kann, fällt die innere Region mit annähernd freier Fallgeschwindigkeit in sich zusammen, bis nach weniger als einer Sekunde Kerndichten erreicht werden. Dann wird der Kollaps abrupt gestoppt, und es entwickelt sich auf Zeitskalen von Millisekunden in der Nähe des sonischen Punktes eine ungeheure Stossfront, welche in die nachstürzenden äusseren Schichten läuft. Dies repräsentiert das Kindheitsstadium der Supernova (Bild 3b).

Der zentrale hochverdichtete Protoneutronenstern gleicht zunächst noch gar nicht dem schliesslich entstehenden Neutronenstern. Er ist noch heiss und leptonreich (Bild 3c). Schon nach etwa einer Sekunde nimmt das Dichteprofil praktisch bereits seinen asymptotischen Wert an. Die Deleptonisierung und Kühlung dauert aber länger, nämlich etwa 10–20 Sekunden. In dieser «Kelvin-Helmholtz-Phase» wird fast die gesamte freiwerdende Energie durch Neutrinos weggetragen (Bild 3d). Die Materie ist aber so dicht, dass die Neutrinos den Protoneutronenstern nur in einem Sekunden dauernden Diffu-

sionsprozess verlassen können. Diesen Neutrinopuls konnte man anlässlich der Supernova 1987A, wie bereits erwähnt, erstmals registrieren.

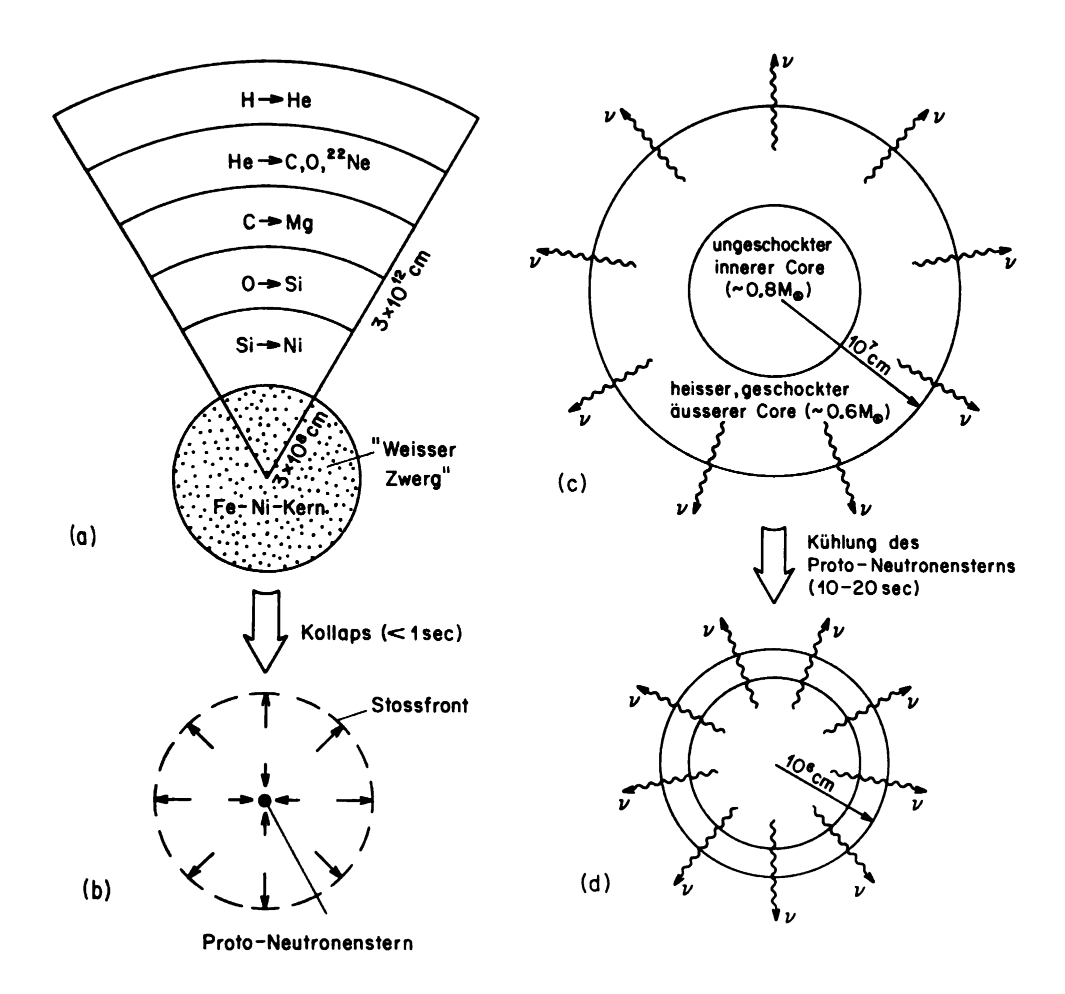


Bild 3 (a) Schematische Struktur eines massereichen Sternes am Ende seiner thermonuklearen Evolution. (b) Kollaps des zentralen Eisen-Nickel-Cores zu einem Protoneutronenstern und Bildung einer Stossfront. (c) Anfängliche Struktur des Protoneutronensterns. (d) Neutrinoausbruch und Kühlung des Protoneutronensterns zu einem «kalten» Neutronenstern.

Fig. 3 (a) Schematic structure of a massive star at the end of its thermonuclear evolution. (b) Collapse of the central iron-nickel core to a protoneutron star and formation of a shock front. (c) Initial structure of the protoneutron star. (d) Neutrino burst and cooling of the protoneutron star to a «cold» neutron star.

Während dieser Zeit ist die Stosswelle längstens in viel weiter aussenliegende Schichten gelaufen. Zur dornigen Frage, ob sie imstande ist, diese in einem kosmischen Feuerwerk abzustossen, werde ich später einiges sagen.

Durch die Sternexplosion wird das interstellare Medium mit schweren Elementen angereichert. Die Produkte der Nukleosynthese können wir nun für SN 1987A nach und nach in allen Einzelheiten registrieren und mit Modellrechnungen vergleichen.

3 Zur Energetik

Supernova-Explosionen sind so energiereich, dass zum vornherein nur zwei Mechanismen in Frage kommen: Entweder explodiert eine Fusionsbombe stellarer Dimension, oder das zentrale Gebiet eines massereichen Sterns wird in einer späten Evolutionsphase instabil, kollabiert in der beschriebenen Weise auf Kerndichten und setzt dabei eine enorme Gravitationsenergie frei. Beim Core-Kollaps (Typ-II-Supernovae) wird insgesamt die Bindungsenergie eines Neutronensterns freigesetzt, welche (in offensichtlichen Bezeichnungen) ungefähr durch den folgenden Ausdruck gegeben ist:

$$\text{Bind.-Energie} \simeq \frac{GM^2_{NS}}{R_{NS}} = (3\times10^{53}\,\text{erg}) \left(\frac{M_{NS}}{M_\odot}\right)^2 \left(\frac{R_{NS}}{10\,\text{km}}\right)^{-1}. \quad (2)$$

(Genauere Rechnungen geben innerhalb eines Faktors 2 dasselbe Resultat.) Diese gewaltige Energie von etwa $0{,}1\,M_\odot c^2$ wird zu fast 99 % in Form von Neutrinos in wenigen Sekunden abgestrahlt. Dies entspricht einer Neutrinoluminosität von etwa 10^{20}mal der Leuchtkraft der Sonne ($L_\odot$). Energetisch gesehen ist die Supernova als optisches Phänomen bloss eine Randerscheinung. Tatsächlich beträgt die gesamte im sichtbaren Bereich abgestrahlte Energie nur etwa 10^{48}–10^{50} erg, und dieser Anteil war für SN 1987A besonders gering. Die totale kinetische Energie der expandierenden Hülle ist im allgemeinen wesentlich grösser, nämlich etwa 10^{51} erg. Dies entspricht anfänglichen Expansionsgeschwindigkeiten der Hülle von etwa 10 000 km/s.

Wir gehen in diesem Aufsatz nicht auf die thermonuklearen Detonationen von relativ massearmen alten Sternen ein, die vermutlich für die (klassischen) Typ-I-Supernovae[3] verantwortlich sind. Erwähnt sei hier lediglich, dass die plausibelsten Kandidaten Weisse Zwerge in engen Doppelsternsystemen sind, die unverbrauchtes Material von einem normalen Begleiter absaugen, wodurch der Weisse Zwerg z. B. überkritisch werden kann. Bei der explosiven Kohlenstoff- oder Sauerstoff-Brennung werden etwa 0,5 MeV pro Nukleon freigesetzt, was für eine Sonnenmasse etwa 10^{51} erg ergibt. Dabei entsteht kein zum Core-Kollaps vergleichbarer Neutrinoausbruch.

[3] Die phänomenologische Klassifizierung der Supernovae in verschiedene Unterklassen wird zunehmend komplizierter, hat aber mit der massgebenden Physik vermutlich wenig zu tun.

4 Evolution von massereichen Sternen, Core-Instabilität

Für hinreichend massive Sterne ($\geq 10\,M_\odot$) steigen zentrale Temperatur und Dichte während der ganzen Evolution mehr oder weniger monoton an. Jedesmal, wenn ein neuer Kernbrennstoff verbraucht ist, zieht sich der ausgebrannte Teil zusammen, bis der nächste Fusionsprozess bei noch höherer Temperatur zündet. Einige der wichtigsten Brennelemente sind längs des Evolutionsweges eines $25\,M_\odot$-Sterns an den Zündungsstellen in Bild 4 markiert.

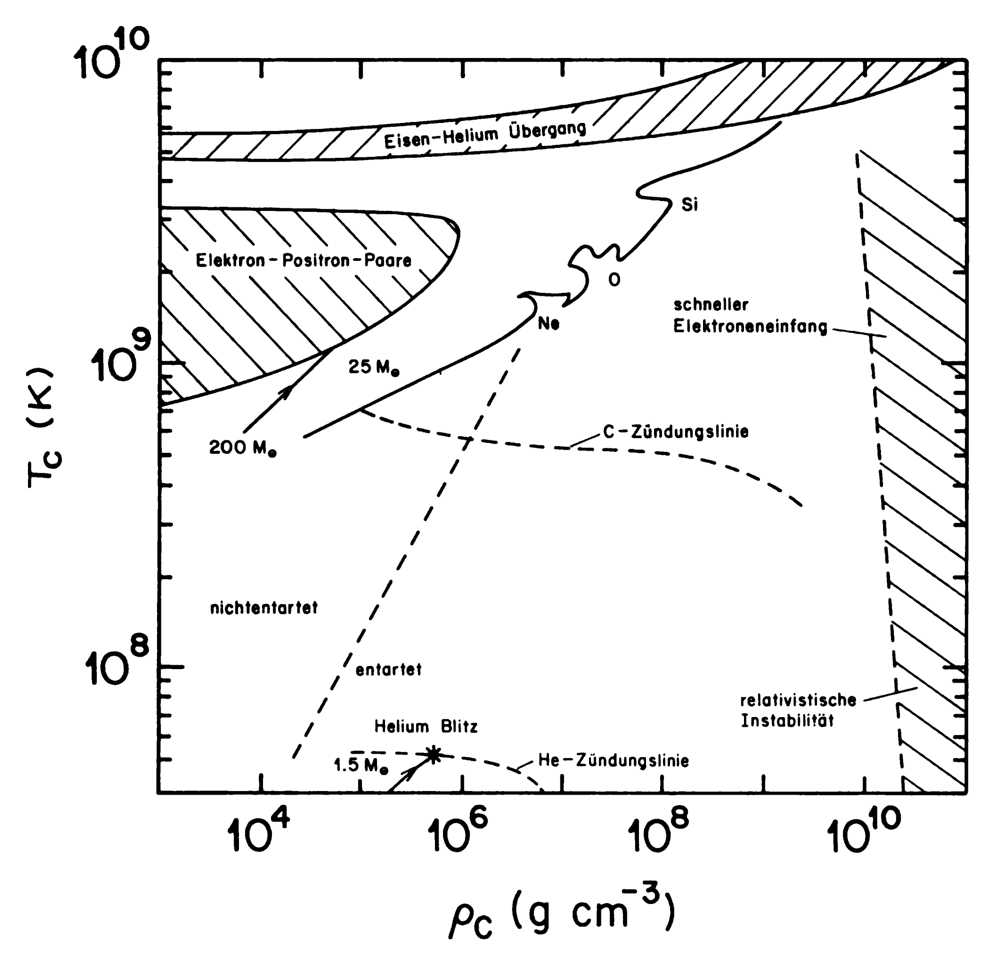


Bild 4 Zentrale Dichte und Temperatur längs des Evolutionsweges eines $25\text{-}M_\odot$-Sterns. Die Zündung von Ne, O und Si im Kern sind längs des Pfades markiert. Die Instabilitätsgebiete sind schraffiert.

Fig. 4 Evolutionary track of a $25\,M_\odot$ star in terms of the locus of the central density and temperature. Ignition of Ne, O and Si in the core are marked along the track. The instability regions are shaded.

Die Silizium-Brennung (Zündtemperatur $\simeq 3\times10^9$K) beginnt erst, wenn der ausgebrannte Core fast die Chandrasekhar-Masse erreicht hat. In diesem Stadium sind die Bedingungen ähnlich wie in einem Weissen Zwerg: Der Druck der Materie, welcher der Gravitation noch standhält, beruht fast ausschliesslich auf den Elektronen, welche stark entartet und extrem relativistisch sind. Der Core ist deshalb nur noch marginal stabil. Im letzten Stadium der Kernenergieerzeugung entsteht ein statistisches Gleichgewicht der Elemente, welches die stabilsten Atomkerne der Eisengruppe sehr stark bevorzugt. Nur Sterne, welche massiver als etwa 11 $M_\odot$ sind, können diese ganze Sequenz in den zentralen Regionen durchlaufen. Darum herum baut sich eine schichtförmige Struktur von weniger weit prozessiertem Material auf (Bild 3a).

Die Silizium-Brennung dauert nur etwa einen Tag. Der resultierende Eisen-Nickel-Core zieht sich rasch weiter zusammen und wird sehr schnell instabil. Die Temperatur wird jetzt nämlich so hoch, dass durch Photodesintegration Eisen und Nickel in α-Teilchen aufgebrochen werden. Ein wesentlicher Teil der freiwerdenden Gravitationsenergie geht deshalb in innere Freiheitsgrade und nicht in translatorische Bewegungen, welche den Druck ausmachen. Bei etwas weniger massiven Sternen (z. B. 15 $M_\odot$) entsteht die Instabilität vor allem durch Elektroneneinfang, wodurch der hauptsächlich auf den Elektronen beruhende Druck reduziert wird.

Bevor wir uns der Kollapsphase zuwenden, wollen wir die bisherigen Ausführungen noch etwas ergänzen. Nach der Kohlenstoffzündung erreicht die optische Leuchtkraft von massiven Sternen etwa $10^5 L_\odot$ und steigt anschliessend nur relativ wenig an. Die Neutrinoluminosität wird aber schon bald viel grösser und erreicht schliesslich Werte, welche die optische Leuchtkraft einer ganzen Galaxie um Grössenordnungen übersteigen! Die Neutrinostrahlung beruht hauptsächlich auf den sog. Paarprozessen. Beispielsweise gibt es in thermodynamischer Häufigkeit sehr viele Positronen im Stern, und gelegentlich wird ein Elektron-Positron-Paar bei Zusammenstössen in ein Neutrinopaar umgewandelt. Bei diesem Prozess ($e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$) können alle Neutrinosorten entstehen. Die Paarprozesse werden uns später wieder begegnen. Leider ist es unmöglich, die enormen Neutrinoverluste von Sternen in vorgerückten Evolutionsphasen auf der Erde nachzuweisen. Diese beschleunigen aber die Evolution sehr stark und haben auch zur Folge, dass die Eigenschaften des resultierenden Eisen-Nickel-Kerns nicht stark von der Ausgangsmasse abhängen (sog. Core-Konvergenz).

Bild 5 zeigt das Dichteprofil für die Zentralregion eines Sterns von 20 $M_\odot$ kurz vor Kollapsbeginn. Die Häufigkeitsverteilung der Elemente für die innersten 6 $M_\odot$ ist in Bild 6 dargestellt.

Bevor Sanduleak-69°202 explodierte, war er ein Blauer Überriese, der vor seiner Ablösung von der Hauptreihe eine Masse von etwa 20 $M_\odot$ besass. Nach dem Wasserstoffbrennen hatte er einen Heliumkern von ca. 6 $M_\odot$ ausgebildet. Zum Zeitpunkt der Explosion waren nach Bild 6 hiervon ca. 1,45 $M_\odot$ in «Eisen», 1,8 $M_\odot$ in Sauerstoff und der Rest in weitere Elemente

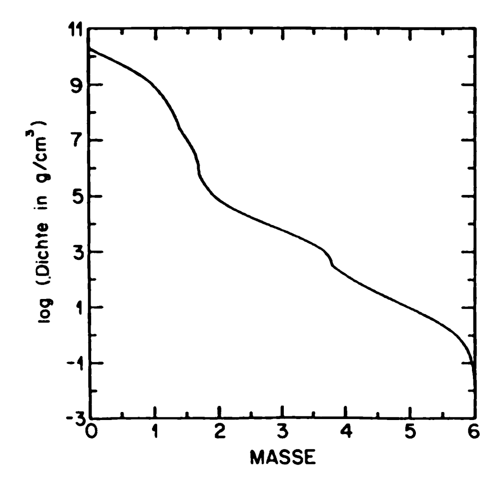


Bild 5 Dichteverteilung eines 20-M$_\odot$-Sterns für die innersten 6 M$_\odot$ kurz vor dem Core-Kollaps (K. Nomoto und M. Hashimoto, 1988).

Fig. 5 Density distribution of a 20 M$_\odot$ star for the central 6 M$_\odot$ at the onset of core collapse (K. Nomoto and M. Hashimoto, 1988).

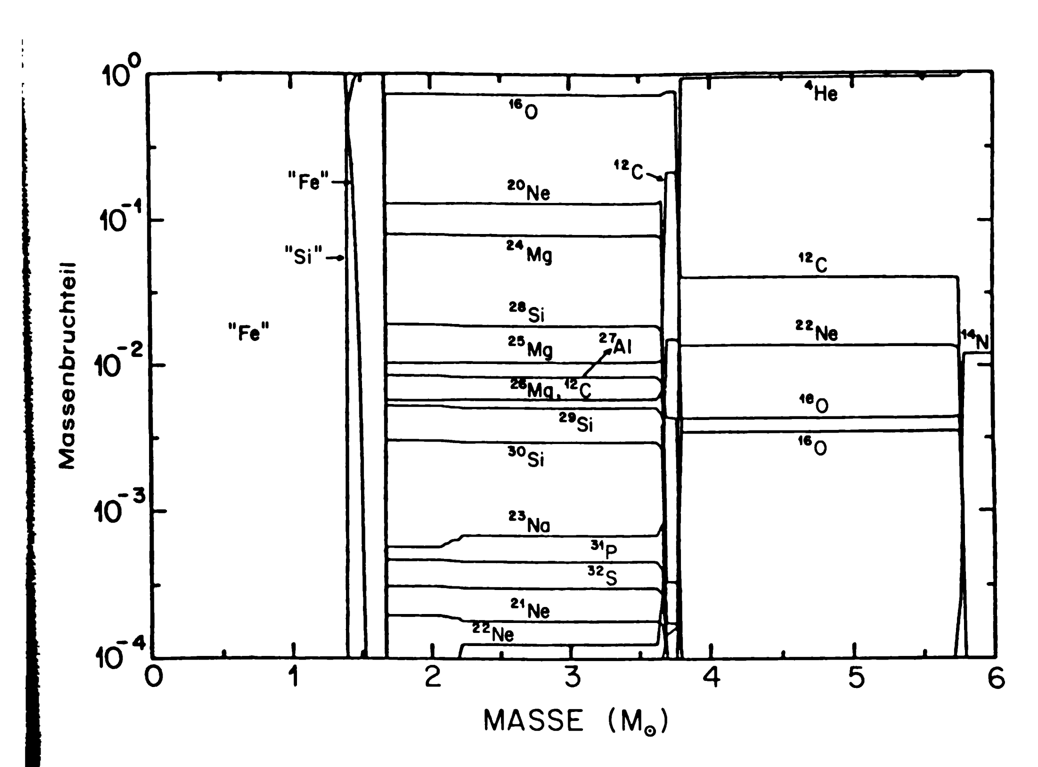


Bild 6 Häufigkeitsverteilung der Elemente für das Profil in Bild 5 (K. Nomoto und M. Hashimoto, 1988).

Fig. 6 **Abundance** distribution of the elements for the profil in Fig. 5 (K. Nomoto and M. Hashimoto, 1988).

wie Kohlenstoff und Stickstoff umgewandelt. Der Stern war aber schon beträchtlich «abgemagert», hatte er doch durch Teilchenwinde in einer Überriesenphase etwa 5 $M_\odot$ verloren (mehr dazu in Abschnitt 8).

5 Kollaps und Rückprall

Bei den Bedingungen (1) zu Beginn der Kollapsphase ist das chemische Potential der Elektronen etwa 6 MeV und steigt danach mit wachsender Dichte proportional zu $\varrho^{1/3}$ an. Damit werden die Neutrinoverluste durch Elektroneneinfang an freien Protonen ($e^- + p \rightarrow n + \nu$) und an komplexen Atomkernen dominiert. Dabei wird die Materie teilweise neutronisiert. Gleichzeitig nimmt die Entropie – trotz Neutrinoverlusten – etwas zu, da die schwachen Wechselwirkungen nicht im Gleichgewicht sind.

Dies ändert sich aber, wenn Dichten $\varrho \geq 3 \times 10^{11}$ g/cm³ erreicht werden. Dann wird die Sternmaterie sogar für Neutrinos optisch dick. Die Rechnung zeigt nämlich, dass die mittlere freie Weglänge von Neutrinos aufgrund elastischer Streuung an Nukleonen (Protonen und Neutronen) und vor allem an komplexen Kernen wesentlich kleiner wird als die Dimension des kollabierenden Sterncores. Letzterer hat z. B. bei einer Dichte von 10^{12} g/cm³ eine Ausdehnung von etwa 40 km, während die mittlere freie Weglänge der Neutrinos auf ca. 300 m gesunken ist. Die fundamentalen Wechselwirkungen, welche für die erwähnten Prozesse verantwortlich sind, beruhen auf den sog. neutralen Stromwechselwirkungen, welche 1973 am CERN in Hochenergieexperimenten entdeckt wurden. Diese sind, wie wir noch genauer sehen werden, für die Physik von Typ-II-Supernovae von ausschlaggebender Bedeutung. Es ist dies ein schönes Beispiel dafür, dass wichtige Entdeckungen in der Grundlagenphysik meistens auch für die Astrophysik und Kosmologie bedeutsam werden.

Oberhalb der «Trapping-Dichte» $\varrho_t \simeq 3 \times 10^{11}$ g/cm³ bleiben die Neutrinos für die Kollapszeit gefangen, weil ihre Diffusionszeit wesentlich länger ist als die Kollapszeit. Auch die schwachen Wechselwirkungen sind nun im Gleichgewicht, und deshalb ändert sich die Entropie nicht mehr. Das gleiche gilt für den Leptonbruchteil (Y_l), d. h. für die Zahl der Leptonen pro Nukleon. Neben den Elektronen entsteht nun auch ein hochentarteter Neutrinosee, dessen Eigenschaften durch die Bedingungen des β-Gleichgewichts bestimmt sind. Detaillierte Rechnungen zeigen, dass die Entropie s pro Nukleon, in Einheiten der Boltzmann-Konstante, den tiefen Wert von etwa 1,5 hat. (Für interstellare Materie ist zum Vergleich $s \simeq 50$–100.) Dafür sind natürlich letztlich die vorangegangenen Neutrinoverluste in den späten Sternstadien verantwortlich. (Zu Kollapsbeginn war $s \simeq 1$.)

Wir halten fest: Oberhalb ϱ_t ist der Kollaps adiabatisch, die Entropie ist klein, und die Materie ist ausserdem teilweise neutronisiert (die Rechnung liefert $Y_l \simeq 0,35$).

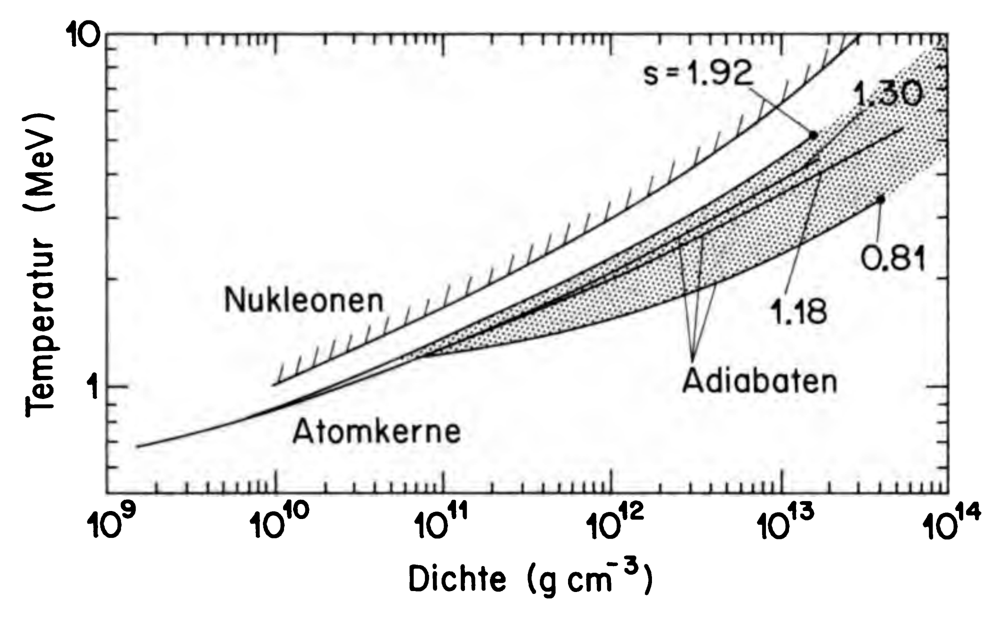


Bild 7 Typische Adiabaten, welche die tatsächlichen Trajektorien der verschiedenen Massenzonen beim Sternkollaps darstellen. Das Übergangsgebiet von komplexen Atomkernen zu Nukleonen ist ebenfalls gezeigt.

Fig. 7 Typical adiabates that represent the actual trajectories of mass zones in stellar collapse. The transition region from complex nuclei to nucleons is also shown.

Die geringe Entropie hat zur Folge, dass der Elektronendruck während der ganzen Kollapsphase dominiert. Dies geht aus Bild 7 hervor, nach welchem Adiabaten mit $s \simeq 1{,}5$ ganz im Bereich der Dichte-Temperatur-Ebene verlaufen, in welchem die Materie fast ausschliesslich aus komplexen Atomkernen besteht. Damit wird die Physik der Kollapsphase sehr einfach, da insbesondere die Zustandsgleichung ziemlich genau bekannt ist: Diese wird im wesentlichen durch das hochentartete extrem relativistische Elektronengas bestimmt.

Bild 8 zeigt eine gewisse Folge von Geschwindigkeitsprofilen über eine Zeitspanne von einer Millisekunde mit den angedeuteten jeweiligen zentralen Dichten. Beim letzten Profil sind im Zentrum schon fast Kerndichten erreicht. Für das weitere Geschehen sind die folgenden qualitativen Eigenschaften des Geschwindigkeitsfeldes wichtig. Ein innerster Teil kollabiert subsonisch und homolog (die Geschwindigkeit ist proportional zum Abstand vom Zentrum). Jenseits des sich nach innen bewegenden sonischen Punktes erreicht die Überschallströmung ein Geschwindigkeitsmaximum, welches schliesslich etwa 10% der Lichtgeschwindigkeit erreicht. Danach fällt die Geschwindigkeit ungefähr mit der Wurzel des Abstandes wieder ab.

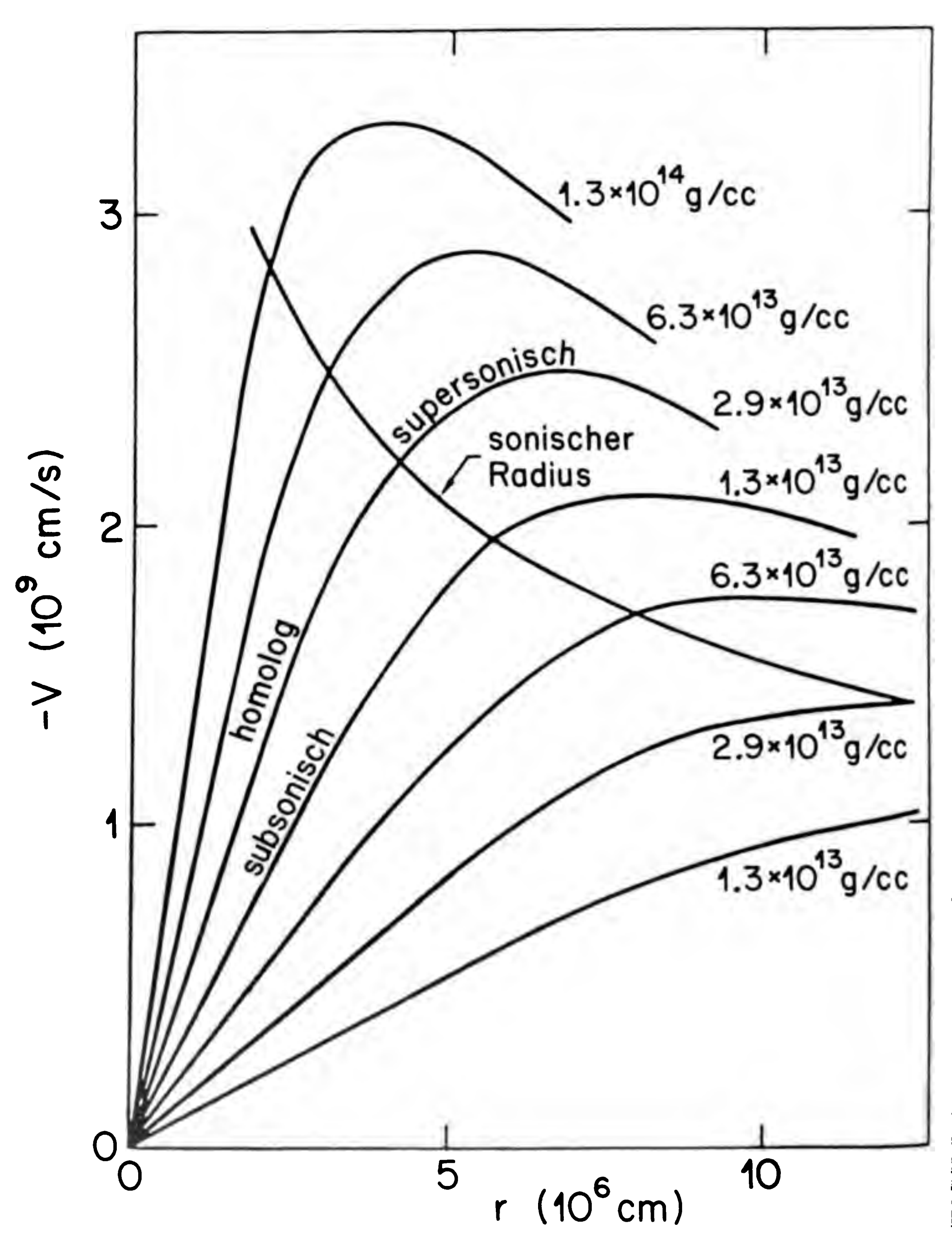


Bild 8 Geschwindigkeitsprofile – parametrisiert durch die zentrale Dichte – **eines** 15-$M_\odot$-Sterns während der letzten Millisekunde vor dem Rückprall (R. Mayle, 1985).

Fig. 8 Velocity profiles – parametrized by the central density – of a 15 $M_\odot$ **star during the final** millisecond before bounce (R. Mayle, 1985).

Wenn fast Kerndichten erreicht sind, beginnen sich die Atomkerne zu überlappen und brechen auf. Bei diesem Übergang zu einer Fermiflüssigkeit wird die Zustandsgleichung plötzlich viel steifer. Der innere homologe Core wird abrupt abgebremst, prallt zurück und erzeugt im herunterprasselnden Material, das mit Zehntausenden von km/sec einfällt und schlagartig abgebremst wird, eine enorme Stosswelle. Man muss sich dabei folgendes vor Augen halten:

Der subsonische homologe Core ist ein Hindernis, auf das die Überschallströmung sozusagen blind einfällt. Keine nach aussen laufenden Druckwellen können den supersonischen Mantel «warnen», damit sich dort die Strömung an das nahe Hindernis anpasst. Wie immer in solchen Situationen, entsteht beim Zusammenstoss der beiden Strömungen eine Stossfront in der Gegend, in der die Machzahl gleich 1 ist. Man beachte, dass diese Stelle bereits in der Einsturzphase im wesentlichen festgelegt wird.

Der zurückbleibende Core wird sehr schnell in ein quasi-hydrostatisches Gleichgewicht übergehen. Da anfänglich der einstürzende Core eine kleine Gesamtenergie hatte, wird die Energie der Stosswelle etwa gleich der Bindungsenergie des ungeschockten zentralen Bereichs sein. Die Schockenergie hat etwa die Grösse 5×10^{51} erg, was ca. 2% der Bindungsenergie des schliesslich entstehenden Neutronensterns ausmacht.

6 Neutrinostrahlung

Der kollabierte Sterncore hat sich nun in einen Protoneutronenstern verwandelt. Dieser besitzt anfänglich die folgende Struktur:

Ein innerer Teil von etwa 0,6–0,8 $M_\odot$ wurde nicht geschockt, und deshalb ist dort die Entropie nach wie vor tief. Die Atomkerne sind aufgrund der hohen Dichte aufgebrochen. Neben Protonen und Neutronen gibt es ein fast vollständig entartetes Elektronengas mit einer Fermienergie, die im Zentrum etwa 200 MeV erreicht. Aufgrund des β-Gleichgewichtes gibt es ausserdem einen vergleichbaren See von elektronischen Neutrinos (ν_e), mit einer etwas geringeren Fermienergie. Aber auch die anderen Neutrinosorten sind in thermodynamischer Häufigkeit vorhanden, wobei aber deren chemische Potentiale gleich Null sind. Die Materie ist zunächst noch leptonreich ($Y_l \simeq 0{,}35$).

Bei einer Dichte von etwa 3×10^{13} g/cm³ schliesst sich der geschockte äussere Core an, dessen Masse ebenfalls ca. 0,5–0,8 $M_\odot$ beträgt. Die durchgelaufene Stossfront hat dort die Atomkerne aufgebrochen und die Entropie wesentlich erhöht. Die Temperatur ist in der Gegend von 20 MeV.

Die weitere Evolution des Protoneutronensterns widerspiegelt sich sehr direkt in den Eigenschaften der entstehenden Neutrinostrahlung. Auf diese wollen wir nun näher eingehen und die theoretischen Erwartungen mit den Beobachtungen vergleichen.

6.1 Deleptonisierung

Nachdem die Stossfront durch die «Neutrinosphäre» am Ort der Trapping-Dichte ϱ_t in einem Abstand $R_\nu \simeq 70$ km gelaufen ist, setzt ein sehr kurzer erster Puls von elektronischer Neutrinostrahlung ein. Vorher sind die Neutrinos hinter dem Schock gefangen. Dieser sog. Deleptonisierungspuls wird durch schnellen Elektroneneinfang an den freien Protonen der aufgebrochenen Atomkerne erzeugt. Dabei werden die äussersten $\sim 0{,}1\,M_\odot$ unterhalb der Neutrinosphäre in der Grössenordnung von zehn Millisekunden stark neutronisiert. Während dieser Zeit ändert sich der Leptonbruchteil in den weiter innen gelegenen Gebieten hoher Neutrinoopazität nicht. Insgesamt werden dabei etwa 10^{51} erg abgestrahlt. Mit den heutigen Detektionssystemen konnte dieser Deleptonisierungspuls anlässlich der SN 1987A unmöglich nachgewiesen werden. Es wird aber in der Zukunft vielleicht möglich werden, bei einer galaktischen Supernova diesen prompten Ausbruch zu messen. Dies wäre für eine detaillierte Diagose sehr wertvoll.

6.2 Thermische Neutrinostrahlung

Nachdem die Leptonzahl in den äusseren Teilen des Protoneutronensterns abgebaut ist, kann die Neutrinoemission für alle Neutrinosorten grob durch eine Schwarzkörperstrahlung zu einer effektiven Neutrinotemperatur (und verschwindenden chemischen Potentialen) beschrieben werden. Detaillierte Studien des Neutrinotransportes zeigen allerdings, dass das Spektrum vor allem bei höheren Energien ziemlich stark vom thermischen abweicht. Im Mittel kann man aber trotzdem von einer Neutrinotemperatur sprechen. Bei dieser Gelegenheit muss noch darauf hingewiesen werden, dass die Paarprozesse, von denen schon in Abschnitt 4 die Rede war, genügend rasch ablaufen, dass in den peripheren Zonen innerhalb der Neutrinosphäre thermische Seen aller Neutrinosorten innerhalb von Millisekunden aufgebaut werden. (Die Neutrinotemperaturen sind dabei etwas verschieden, da die Reaktionsmöglichkeiten und die Querschnitte teilweise unterschiedlich sind. Aus dem gleichen Grund fallen auch die Neutrinosphären für die verschiedenen Neutrinosorten nicht genau zusammen.)

Im Unterschied zum prompten Deleptonisierungspuls dauert die thermische Neutrinostrahlung wesentlich länger, da die Diffusionszeiten der Neutrinos aus dem innersten Teil typisch einige Sekunden betragen. Es braucht deshalb etwa 10 Sekunden, bis dort die Leptonzahl abgebaut ist und die Struktur der Materie der eines Neutronensterns gleicht (siehe Bild 9). In dieser Zeit ist auch die Temperatur stark abgesunken, und man kann bereits von kalter Neutronensternmaterie sprechen. Numerische Simulationen zeigen, dass das Dichteprofil schon nach weniger als einer Sekunde sich kaum noch verändert.

Die gesamte abgestrahlte Neutrinoenergie sollte fast die Bindungsenergie (2) eines Neutronensterns, d. h. etwa 3×10^{53} erg, ausmachen. Wir zeigen nun, dass dies die Beobachtungen wunderbar bestätigt haben.

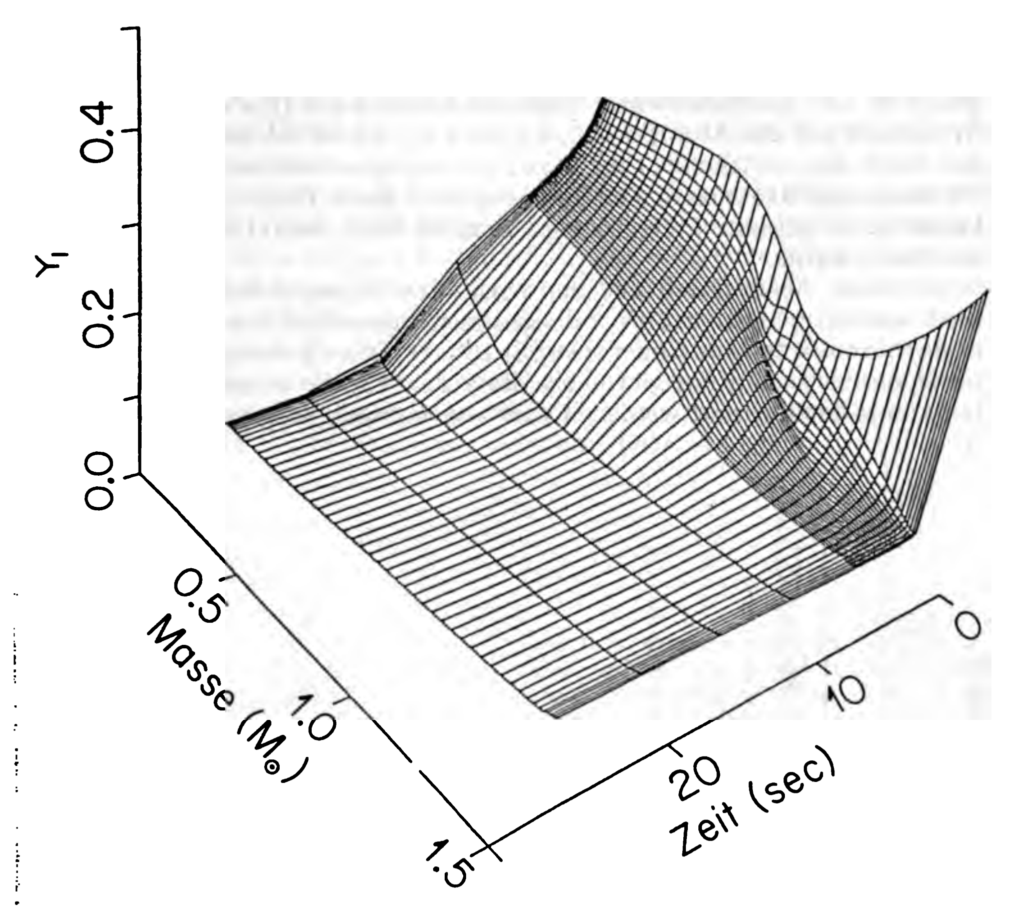


Bild 9 Leptonbruchteil Y_l pro Baryon (e, υ_e) als Funktion der Zeit (in Sekunden) und der eingeschlossenen Baryonmasse (in $M_\odot$) für die ersten 25 Sekunden eines Protoneutronenstern-Modells. Der Mantel ist schnell deleptonisiert. Für das Innere dauert dies viele Sekunden (A. Burrows, 1988).

Fig. 9 Lepton fraction Y_l per baryon (e, υ_e) versus time (in seconds) and enclosed baryon mass (in $M_\odot$) for the first 25 seconds of a protoneutron star model. The mantle is deleptonized quickly. For the interior this lasts many seconds (A. Burrows, 1988).

6.3 Neutrinostrahlung von SN 1987A

Einige Stunden bevor SN 1987A als heller Stern am Himmel entdeckt wurde, erreichten Neutrinos am 23. Februar 1987 die Erde und blieben zu einem winzigen Teil in grossen Detektoren tief unter der Erde hängen. Bild 10 zeigt die Daten von Kamiokande II in Japan und von IMB in Cleveland. Beide Detektoren sind sehr ähnlich: Grosse Volumina von ultrareinem Wasser sind von

Tausenden von Photoröhren umgeben und befinden sich tief unter dem Boden, damit der Untergrund durch die kosmische Strahlung möglichst gering ist. Die nachgewiesenen Neutrinos beruhen alle (mit einer möglichen Ausnahme) auf der Absorption $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, wobei die erzeugten Positronen durch das entstehende Cerenkov-Licht nachgewiesen wurden. Alle anderen denkbaren Reaktionen sind um mindestens einen Faktor 100 unterdrückt. Leider ist die gesamte Ereignismenge ziemlich klein, da nur etwa 1 in $10^{15}\bar{\nu}_e$'s absorbiert wurde.

Mit Hilfe dieser Daten und den bekannten Eigenschaften des Detektors kann man ausrechnen, wie gross die gesamte abgestrahlte Energie in Antielektronneutrinos war. Man findet etwa 50×10^{51} erg. Da es je drei Sorten von Neutrinos und Antineutrinos gibt, muss diese Zahl für die totale Neutrinostrahlung mit 6 multipliziert werden. Es ist sehr befriedigend, dass dabei gerade

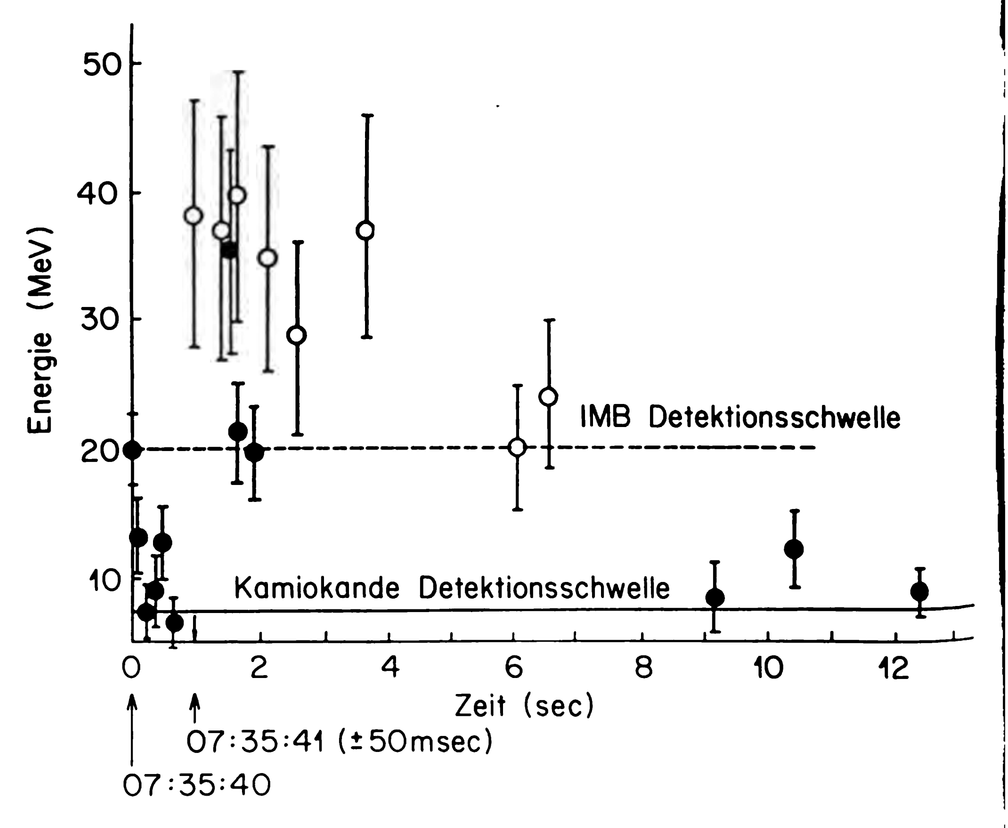


Bild 10 Neutrinoausbruch von der Supernova 1987A. Die ausgefüllten Punkte stellen die registrierten Ereignisse von Kamiokande II und die offenen diejenigen von IMB dar (M. Koshiba, 1987).

Fig. 10 Neutrinoburst from supernova 1987A, as observed by Kamiokande II (filled circles) and IMB (open circles) (M. Koshiba, 1987).

der Wert (2) für die Bindungsenergie eines Neutronensterns herauskommt. Gleichzeitig ergibt sich bei der Analyse auch eine mittlere Neutrinotemperatur von 3–5 MeV, was einer mittleren Neutrinoenergie von 10–15 MeV entspricht. Auch dies stimmt mit den theoretischen Erwartungen überein, wie wir gleich noch sehen werden.

Anhand einiger Kurven wollen wir den Vergleich von Modellrechnungen mit den Beobachtungen noch etwas genauer beschreiben. Bild 11 zeigt die integrierte Zahl der erwarteten Ereignisse für den K-II-Detektor als Funktion der Zeit. Aufgrund von Unsicherheiten in der Core-Masse wurde diese Grösse etwas variiert. Ansonsten enthält die Rechnung keine freien Parameter. Freilich haben die theoretischen Modelle noch beträchtliche Unsicherheiten. So ist beispielsweise die Zustandsgleichung bei Kerndichten und darüber nicht hinreichend genau bekannt. Man kann aber trotzdem von einer halbquantitativen Übereinstimmung sprechen. Dies ist keineswegs selbstverständlich.

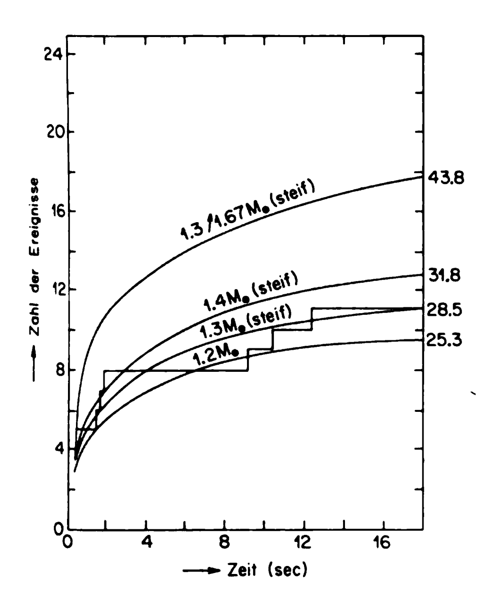


Bild 11 Integrierte Zahl der Ereignisse in Kamiokande II als Funktion der Zeit für die ersten 18 Sekunden nach dem Rückprall für verschiedene Core-Massen. Die Stufenfunktion zeigt die gewonnenen Daten. Bei der obersten Kurve wird Materie akkretiert. Die Zahlen rechts geben die gesamte abgestrahlte $\bar{\nu}_e$-Energie (nach A. Burrows [1988]).

Fig. 11 Integrated number of events in Kamiokande II versus time for the first 18 seconds after bounce for various core masses. Superposed is the actual data. Matter is accreted in the upper curve. The numbers on the right give the total $\bar{\nu}_e$-energy loss (after A. Burrows [1988]).

In Bild 12 ist die mittlere Antielektronneutrino-Energie als Funktion der Zeit für eine Reihe von Modellrechnungen aufgetragen. Das punktierte Gebiet entspricht dem besten Fit an die Daten in Bild 10. Wiederum erhält man eine vernünftige Übereinstimmung. Dasselbe trifft für die $\bar{\nu}_e$-Luminosität in Bild 13 zu.

Ähnliche Rechnungen für den Kollaps auf ein Schwarzes Loch liefern ganz andere Neutrinosignale. Schon aus diesem Grund erwartet man deshalb, dass in SN 1987A ein Neutronenstern (Pulsar) entstanden ist, der vermutlich bald sichtbar wird.

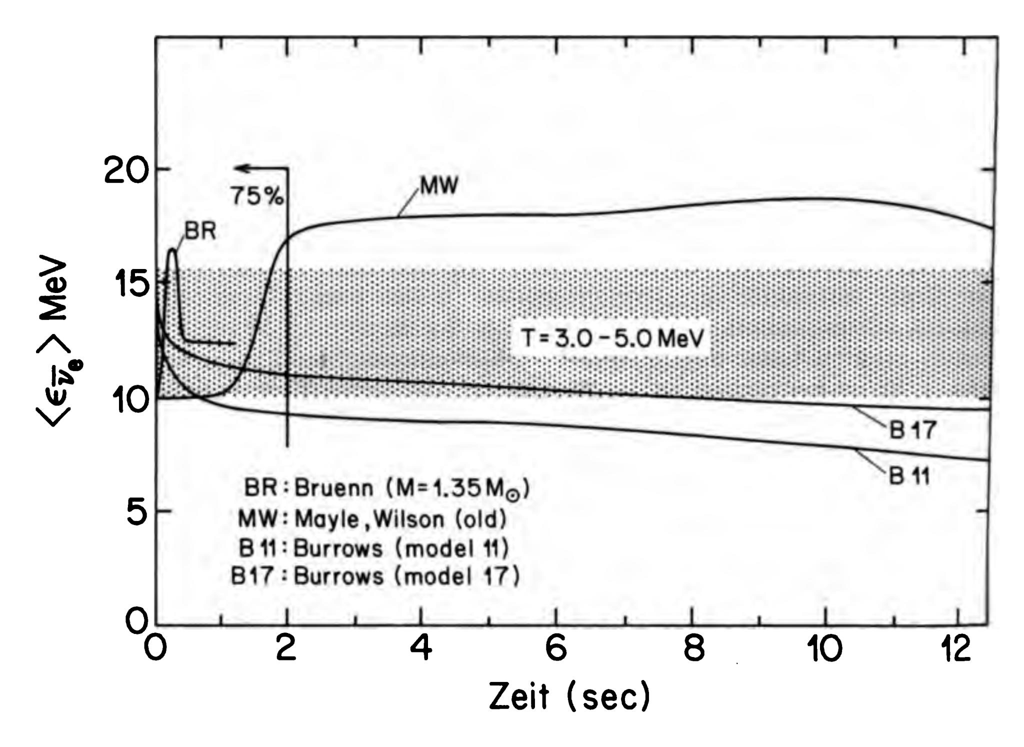


Bild 12 Mittlere Antielektronneutrino-Energie als Funktion der Zeit für verschiedene Modellrechnungen. Das punktierte Gebiet passt am besten zu den Daten (A. Burrows, 1988).

Fig. 12 Average anti-electron neutrino energy vs. time for a sample of model calculations. The dark region fits the data best (A. Burrows, 1988).

Zusammenfassend können wir sagen, dass der zeitliche Verlauf und die Energieverteilung des beobachteten Neutrinoausbruchs ganz den theoretischen Erwartungen entsprechen. Damit haben unsere Vorstellungen über den Gravitationskollaps und die Bildung von Neutronensternen eine glänzende Bestätigung erfahren.

Das Neutrinosignal von SN 1987A gestattet auch interessante Rückschlüsse auf grundlegende Eigenschaften der Neutrinos als Elementarteilchen. Beispielsweise würde eine von Null verschiedene Neutrinomasse zu einer zeitlichen Verschmierung des Neutrinosignals führen, da die Laufzeit eines Neutrinos von seiner Energie (E_ν) abhängen würde: Die Verzögerung Δt gegenüber der Lichtlaufzeit wäre (m_ν = Neutrinomasse):

$$\Delta t = 2{,}6 \text{ s} \left(\frac{D}{50 \text{ kpc}}\right) \left(\frac{m_\nu c^2}{10 \text{ eV}}\right) \left(\frac{10 \text{ MeV}}{E_\nu}\right)^2 . \qquad (3)$$

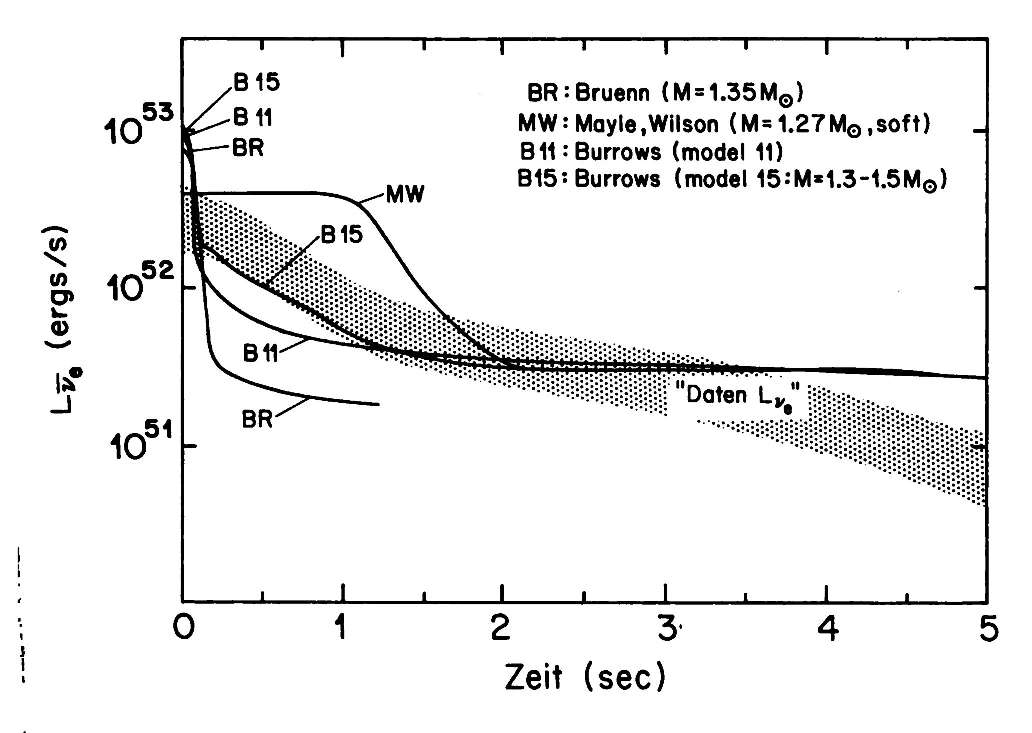


Bild 13 Antielektronneutrino-Luminosität ($L_{\bar{\upsilon}_e}$) als Funktion der Zeit (A. Burrows, 1988).

Fig. 13 Anti-electron neutrino luminosity ($L_{\bar{\upsilon}_e}$) versus time (A. Burrows, 1988).

In dieser Formel ist D die Distanz zur Grossen Magellanschen Wolke ($\simeq$ 55 kpc). Eine sorgfältige Analyse liefert für die Masse des (Anti-)Elektronneutrinos eine Schranke, die vergleichbar zur besten Limite ist, die man heute vom Tritium-Zerfall hat. Wesentlich bessere Schranken als von bisherigen Laboratoriumsexperimenten erhält man für ein mögliches magnetisches Moment der Neutrinos.

Interessant ist auch, dass die allgemein relativistische Zeitverzögerung von etwa 5 Monaten, welche durch das Gravitationsfeld der Milchstrasse verursacht wird, für Licht und Neutrinos innerhalb der Unsicherheiten gleich ausgefallen ist. (Der Zeitunterschied von einigen Stunden ist natürlich verständlich, da die optische Strahlung erst einsetzte, nachdem die Stosswelle die Sternoberfläche erreicht hatte.) Dies liefert einen recht genauen Test des schwachen Äquivalenzprinzips, welches ein Grundpfeiler der Allgemeinen Relativitätstheorie ist.

7 Prompte oder verzögerte Explosion

Wir kommen nun zu einem eher betrüblichen Kapitel. Es betrifft dies die Frage nach der Explosion der Hülle.

Die ursprüngliche Energie der Stosswelle ist zwar ein Vielfaches der gesamten Energie, die bei einer typischen Supernova in die Hülle transferiert wird. Es stellt sich aber heraus, dass der nach aussen laufende Schock sehr stark gedämpft wird. Dies ist einfach zu verstehen. Bei der Durchquerung des äusseren Cores wird die Materie auf etwa 20 MeV erhitzt, und dabei werden die Eisen-Nickel-Kerne verdampft (Bild 14). Dies kostet etwa 8 MeV pro Nukleon, was sich für die Dissoziation von einer halben Sonnenmasse von Eisen auf etwa 10^{52} erg aufaddiert, womit die ganze Schockenergie aufgebraucht ist.

Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass sich die Stosswelle in allen zurzeit existierenden numerischen Simulationen für Ausgangssterne wie Sanduleak-69°202 totläuft. Die nach aussen laufende Stosswelle verwandelt sich dabei in einen stehenden Akkretionsschock, und es kommt nicht zur Explosion der Hülle. Vielmehr fällt mehr und mehr Materie auf den Neutronenstern und verwandelt diesen in ein Schwarzes Loch. Freilich wird in den bisherigen Modellrechnungen, bei sonst realistischer Behandlung der physikalischen Vorgänge, immer sphärische Symmetrie angenommen. Es ist denkbar, dass die Berücksichtigung von Rotation (und Magnetfeldern) dazu führen könnte, dass allein die hydrodynamisch umgesetzte Energie für eine Explosion der Hülle ausreicht. Erste aufwendige Versuche in dieser Richtung sind allerdings nicht gerade besonders vielversprechend.

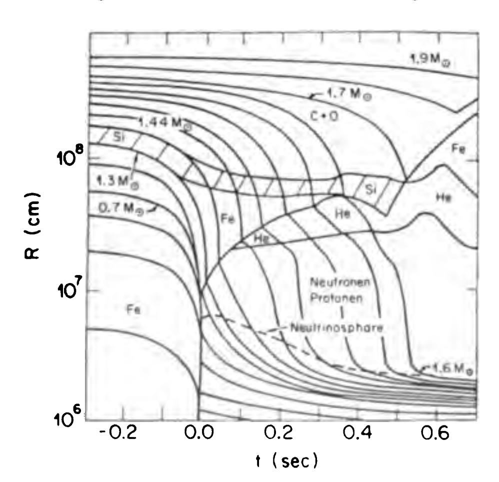


Bild 14 Kollaps und Rückprall eines 15-M☉-Sterns. Die Schrumpfung der Neutrinosphäre ist ebenfalls gezeigt (R. Mayle, 1985).

Fig. 14 Collapse and bounce of a 15M☉ star. The shrinking of the neutrino sphere is also shown (R. Mayle, 1985).

Ein interessanter, aber noch ungewisser Ausweg aus diesem Dilemma wird zurzeit eifrig studiert. Bei diesem erhofft man sich eine genügende Wiederbelebung des Schocks durch Neutrinoenergie-Deposition. Neutrino-Antineu-

-Paare, welche in der heissen Materie hinter der Stossfront entstehen, en teilweise in weniger dichten und kühleren Schichten ausserhalb der rinospshäre absorbiert. Einfache Abschätzungen zeigen, dass die netto nierte Energie für eine verzögerte Explosion ausreichen könnte. Dabei sich allerdings, dass die Wirksamkeit dieses Mechanismus sehr empfindvon den Temperaturverhältnissen und auch von einer genauen Behanddes Neutrinotransports abhängt. Numerische Simulationen führen je dem zu einer erfolgreichen oder zu keiner Explosion. In Anbetracht der plexität der Vorgänge dürfte eine eindeutige Entscheidung in dieser e nicht so schnell möglich sein.

ei all dem darf man die bereits in Abschnitt 3 betonte Tatsache nicht vern, dass die gesamte Energie, welche bei einer Supernova in die Hülle feriert wird, lediglich etwa 1% der total freigesetzten Gravitationsenergie acht. Damit ist die Explosion der Hülle eine Randerscheinung und desauch nicht leicht zu verstehen. Trotzdem ist die Situation sehr unbefriend.

ie Schockfront, welche zu Beginn der Explosion durch die Hülle von luleak-69°202 jagte, trieb diese auf enorme Geschwindigkeiten. In den n Tagen nach dem Supernova-Ausbruch bestimmte man aus Emissionsli-Geschwindigkeiten von ungefähr 30 000 km/s. Als Blauer Überriese war Ausgangsstern viel kompakter als Rote Überriesen, die man bis anhin als äufersterne von Typ-II-Supernova-Explosionen betrachtete. Sein Radius ca. 3×10^7 km oder 40 Sonnenradien ($R_\odot$). Deshalb ging auch ein ungenlich grosser Anteil der Schockenergie in die Expansion der Hülle, wähl die Leuchtkraft untypisch klein war.

ichtkurve, radioaktiver Zerfall von SN 1987A

der atypische Verlauf der Lichtkurve mit der relativ kompakten Struktur Vorläufersterns zusammenhängt, schicken wir ein paar Bemerkungen zur lution von Sanduleak-69°202 voraus.

ehr wahrscheinlich war dieser Stern vor noch etwa 10 000 Jahren ein r Überriese (mit $R \simeq 800 R_\odot$). Dafür sprechen spektroskopische Beobungen der Supernova im optischen und ultravioletten Spektralbereich, schmale Spektrallinien etwa von Stickstoff zeigen, welche als Evidenz für umstellare Materie gedeutet werden. Man stellt sich dabei vor, dass diese einem «sanften Wind» im Roten-Überriesen-Stadium herrührt. Dabei den gut drei Sonnenmassen mit kleiner Geschwindigkeitsdispersion weggen. Beim Übergang des Sterns in einen Blauen Überriesen stieg die chwindigkeit des Windes an. Dies führte zu einer Trennung von altem neuem Wind, bei der die Materie des alten Windes zu einer Schale vertet wurde, welche die UV-Strahlung der Supernova anregte und ionie. Diese Schale hat jetzt einen Durchmesser von etwa zwei Lichtjahren.

Aber auch Entwicklungsrechnungen zeigen, dass ein solcher Evolutionsweg durchaus möglich ist. Ein Beispiel ist in Bild 15 gezeigt. Wesentlich dafür ist offenbar ein relativ geringer Gehalt an «schweren» Elementen, welcher in der Magellanschen Wolke nur etwa ¼ der Sonnenumgebung ausmacht. Dies ändert den Massenverlust, der für massereiche Sterne in späten Evolutionsstadien sehr beträchtlich ist und die Entwicklungspfade massgebend beeinflusst. Aber auch Mischprozesse können zu einer optisch weniger dicken Hülle führen, wodurch der Stern heisser wird. Es handelt sich aber insgesamt um eine sehr heikle Angelegenheit, bei der z. B. auch die verwendeten Kriterien für konvektive Instabilität eine Rolle spielen. Ferner können Mischprozesse wich-

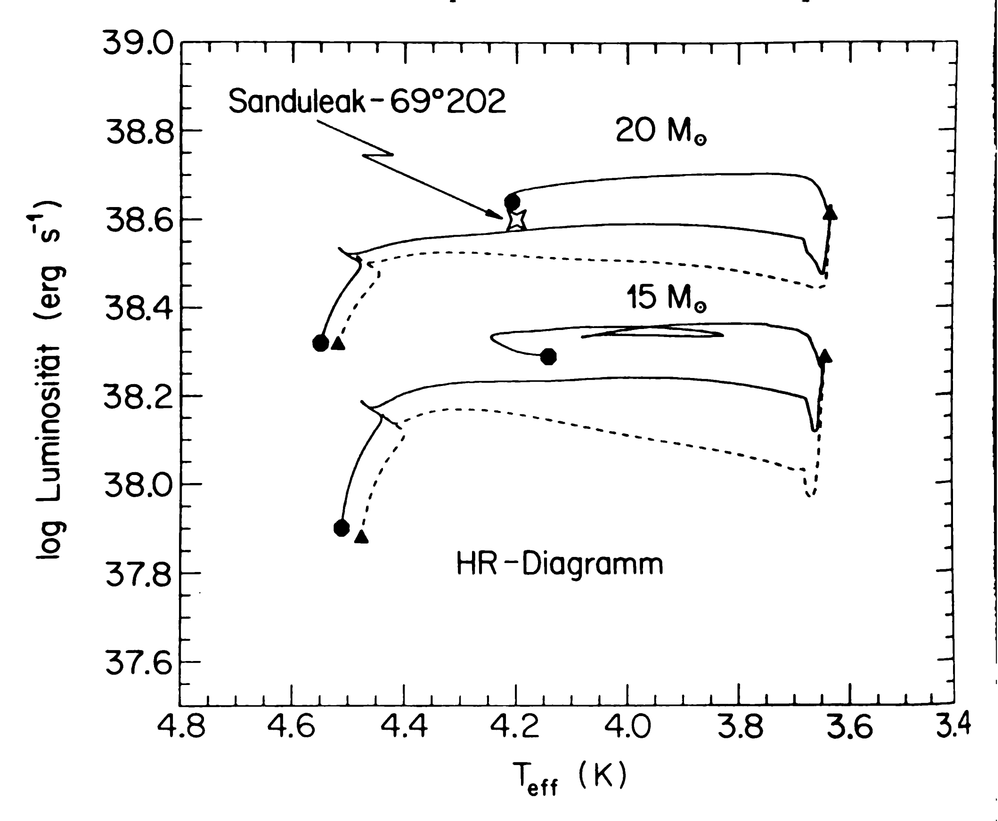
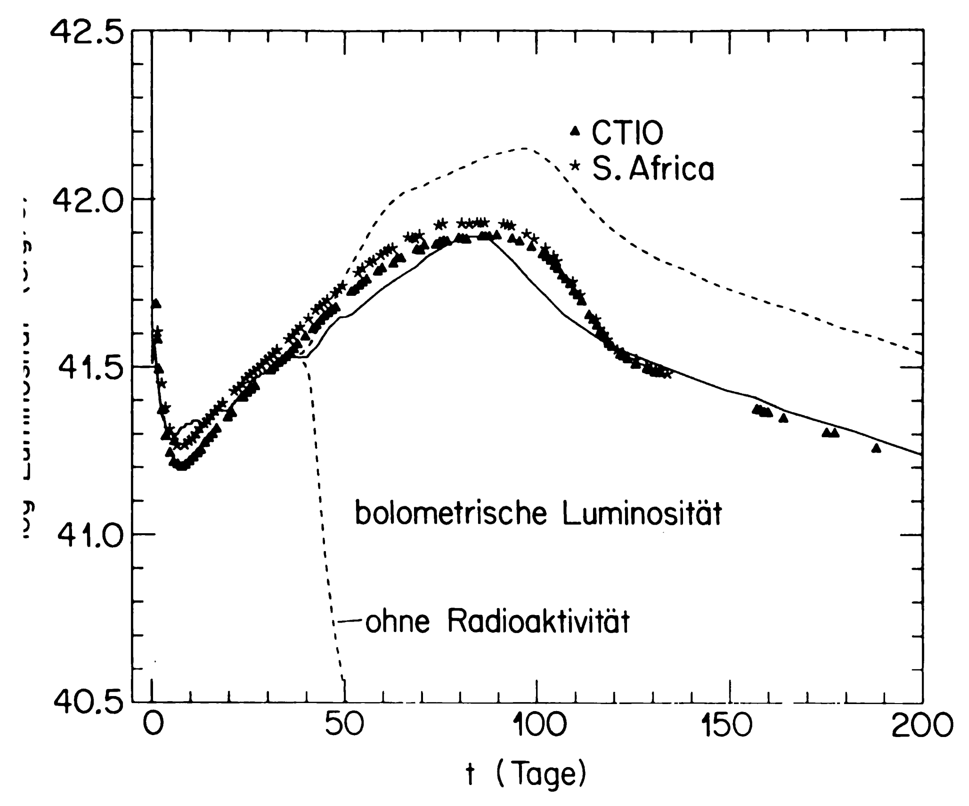


Bild 15 Herzsprung-Russel-Diagramme für Sterne von 15 und 20 $M_\odot$. Für die ausgezogenen Linien ist die Häufigkeit Z der Elemente mit Massenzahl grösser als 4 nur ein Viertel der Sonnenumgebung. Die gestrichelten Linien gehören zu $Z = Z_\odot$. Die Position von Sanduleak-69°202 ist ebenfalls gezeigt (S. E. Woosley, 1988).

Fig. 15 Herzsprung-Russel diagrams for stars of 15 and 20 $M_\odot$ and composition appropriate to the Large Magellanic Cloud ($Z_\odot/4$) (solid lines) and to the Sun (dashed lines). The position of Sanduleak-69°202 is also shown (S. E. Woosley, 1988).

sein, welche durch die Rotation induziert werden. Unabhängig davon finman jedenfalls in der Umgebung von SN 1987A sowohl Rote als auch ue Überriesen (und gleichzeitig auch Wolf-Rayet-Sterne).

Da der Vorläuferstern relativ kompakt war und steile Dichtegradienten te, stieg die anfängliche Helligkeit in Stunden (und nicht in Tagen) stark und erreichte ein erstes Maximum von etwa 10^{42} erg/s, was nur ungefähr 6 einer typischen Typ-II-Supernova ausmacht. Innert Tagen änderten sich allen Wellenlängen die diskreten und kontinuierlichen Spektren, entsprend einer sehr raschen Abnahme der effektiven Temperatur. Gleichzeitig auch die photosphärische Geschwindigkeit stark ab. Zumindest qualitativ



d 16 Vergleich der beobachteten bolometrischen Lichtkurve mit verschiedenen Modellhnungen. Ohne radioaktives ^{56}Ni (untere gestrichelte Kurve) wäre die Lichtkurve nach etwa 40 gen stark abgesunken. Die obere gestrichelte Kurve entspricht der doppelten Menge von ^{56}Ni für die ausgezogene, für welche der radioaktive ^{56}Ni-Anteil 0,07 $M_\odot$ beträgt (S. E. Woosley, 8).

. 16 Comparison of the observed bolometric light curve with various model calculations. hout radioactive ^{56}Ni (lower dashed line) the supernova light curve would have decreased ngly after around 40 days. The upper dashed line corresponds to twice as much ^{56}Ni as for the d one, for which the mass of ^{56}Ni is 0,07 $M_\odot$ (S. E. Woosley, 1988).

sind diese Fakten alle sehr verständlich. So ist z. B. die Leuchtkraft proportional zum Produkt von Sternradius und Explosionsenergie und deshalb deutlich geringer als bei der Explosion eines Roten Überriesen.

Nach weniger als 40 Tagen war die ursprüngliche thermische Energie verbraucht. Die weitere Helligkeitsentwicklung der Supernova wird seither durch die Zerfallskette

$$^{56}\mathrm{Ni} \xrightarrow{T_{1/2} = 6{,}1\,\mathrm{d}} {}^{56}\mathrm{Co} \xrightarrow{(T_{1/2} = 78{,}8\,\mathrm{d})} {}^{56}\mathrm{Fe} \qquad (4)$$

bestimmt (Bild 16). Diese radioaktive Energiequelle führte zu einem zweiten breiten Maximum der Leuchtkurve nach etwa 100 Tagen und zum anschliessenden langsamen Abfall, der sehr schön die Lebensdauer von ^{56}Co widerspiegelt. Nach etwa 200 Tagen war die Supernova nicht mehr atypisch (Bild 17). Aus der exponentiellen Abnahme der Leuchtkraft lässt sich leicht die ursprüngliche Menge von ^{56}Ni berechnen. Man findet etwa 0,07 $M_\odot$.

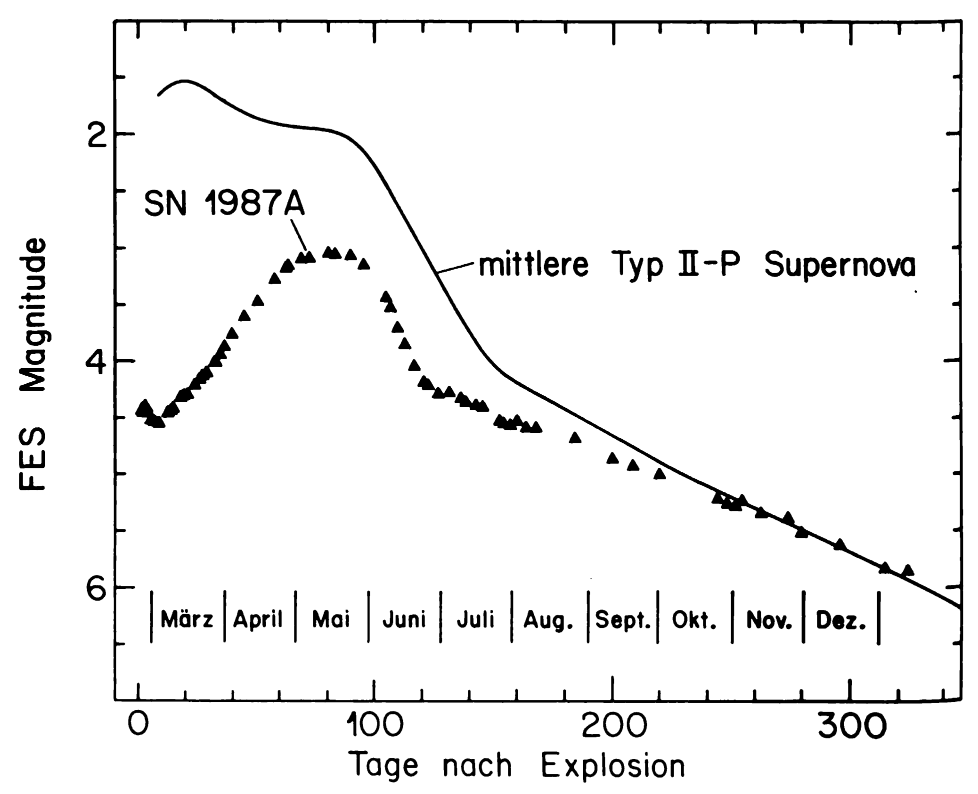


Bild 17 Vergleich der Leuchtkurve von 1987A mit der mittleren Leuchtkurve von Typ-II-P-Supernovae (P = Plateau) (V. Trimble, 1988).

Fig. 17 Comparison of the light curve of 1987A with the average of normal plateau-type SN 'I's (V. Trimble, 1988).

Ein allfälliger Pulsar könnte ebenfalls zur Leuchtkraft beitragen. Seine abgestrahlte elektromagnetische Energie beträgt

$$L_P \simeq 10^{10} L_\odot \left(\frac{B}{10^{12}\,G}\right)^2 \left(\frac{P}{ms}\right)^{-4}, \tag{5}$$

wo B das Magnetfeld des Pulsars und P dessen Rotationsperiode bezeichnen. Auf das Konto des Pulsars können aber aufgrund der tatsächlichen Leuchtkurve nicht mehr als ca. 10^{40} erg/s gehen, was die Schranke

$$\left(\frac{B}{10^{12}\,G}\right)^2 \left(\frac{P}{ms}\right)^4 < 2{,}6\times 10^{-4} \tag{6}$$

impliziert.

9 Nukleosynthese, Röntgen- und Gammastrahlung

Die grosse Menge von ^{56}Ni zur Erklärung der optischen Lichtkurve führte unmittelbar zur Voraussage, dass früher oder später auch γ-Linien von angeregten Kernzuständen sichtbar werden sollten, sobald die expandierende Hülle für diese Strahlung durchsichtig würde. Insbesondere erwartete man die Linien des ^{56}Co-Zerfalls bei 1238 keV und 847 keV. Etwas vorher sollte sich diese Linienstrahlung aufgrund von Vielfachstreuung als hartes Röntgenkontinuum ankündigen.

Früher als erwartet, nämlich bereits Mitte August 1987, wurde die Röntgenstrahlung mit dem japanischen Satelliten Ginga und im deutsch-sowjetischen Experiment HEXE auf der sowjetischen Raumstation MIR tatsächlich beobachtet. Entgegen den Voraussagen zeigte diese Strahlung aber keinen raschen Anstieg und anschliessenden exponentiellen Abfall, sondern blieb ziemlich konstant. All dies bedeutet, dass die Hülle bei der Explosion stark durchmischt wurde und dabei Ni und Co in Schichten geringer optischer Dicke gelangten. Darüber, wie dies möglich war, wird noch gerätselt. Zu den verschiedenen Vorschlägen gehören Rayleigh-Taylor-Instabilitäten, welche durch die Strahlung von Ni und Co verursacht werden könnten. Möglicherweise haben aber auch rotationsinduzierte meridionale Zirkulationen für die starke Durchmischung gesorgt.

Schliesslich wurden auch die erwarteten γ-Linien bei 1238 keV und 847 keV beobachtet. Die anfängliche Evidenz mit dem schlecht auflösenden NAI-Detektor auf dem SMM(Solar Maximum Mission)-Satelliten war zwar noch nicht überzeugend, aber schon Ende 1987 wurden diese Linien in drei Ballonflügen eindeutig registriert. Auch dieser Zeitpunkt war überraschend früh.

Die Strahlungsverluste im Röntgen- und Gammabereich sind dafür verantwortlich, dass seit etwa Mitte 1988 die bolometrische Lichtkurve etwas unter

die exponentielle Zerfallskurve abgefallen ist. In jüngster Zeit hat sich dieser Trend verlangsamt. Ob die neue Energiequelle von einem Pulsar herrührt, ist allerdings noch sehr ungewiss, da z. B. auch andere radioaktive Zerfälle mit längeren Halbwertszeiten in Frage kommen, wie z. B. ^{57}Co ($T_{½}$ = 272 d).

Die HEXE-Messungen des harten Röntgenspektrums (20–200 keV) während des ganzen Jahres 1988 zeigen, dass die Röntgenintensität langsam abnimmt (Bild 18). Dieser Abfall passt genau zu den Erwartungen des ^{56}Co-Zerfalls und der Expansion der Hülle.

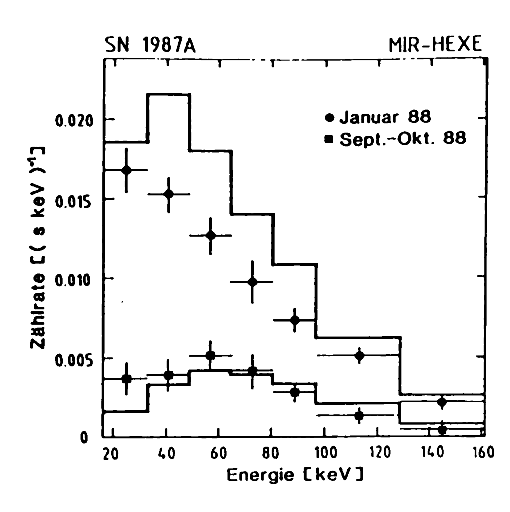


Bild 18 Energieverteilung der Röntgenstrahlung im Januar und im Herbst 1988, gemessen mit dem Röntgendetektor HEXE an Bord der sowjetischen Raumstation MIR (J. Trümper, 1989).

Fig. 18 X-ray distribution from January to fall 1988, measured with the X-ray detector HEXE on board of the Sowjet station MIR (J. Trümper, 1989).

Die weiteren Produkte der Nukleosynthese werden nun nach und nach sichtbar werden. Die Spektren der Supernova 1987A zeigten z. B. schon früh Überhäufigkeiten von schweren Elementen wie N, O und Ba. Barium wird durch langsamen Neutroneneinfang, ausgehend von Eisen, erzeugt, wofür die Bedingungen in der He-brennenden Region günstig sind. Offenbar ist bei der Explosion die Heliumschicht relativ stark in die äusseren wasserstoffreichen Schichten hineingemischt worden. Einblicke in zunehmend tiefere Schichten im Laufe der nächsten Jahre werden es ermöglichen, die Modelle der stellaren Nukleosynthese im einzelnen zu überprüfen.

10 Abschliessende Bemerkungen

Zur Zeit der Niederschrift dieses Aufsatzes wurde die Entdeckung eines sehr schnellen Pulsars ($P \simeq 0{,}5$ ms) verbreitet. Falls dieser tatsächlich gesehen wurde, dann ist er aber bereits wieder verschwunden. Versuche von anderen Gruppen, die angekündigten optischen Pulse ebenfalls nachzuweisen, haben alle fehlgeschlagen.

Es war nicht unsere Absicht, alle Aspekte des enormen Beobachtungsmaterials von SN 1987A hier zu besprechen. Als auffällige Erscheinung möchte ich noch auf die ringförmigen Lichtechos (Bild 19) hinweisen, welche durch Streuung an der schichtartigen Struktur des interstellaren Gases entstehen. Für eine gegebene Lichtlaufzeit liegen die Echos auf einem Rotationsparaboloid, dessen Hauptachse mit der Richtung zum Beobachter zusammenfällt.

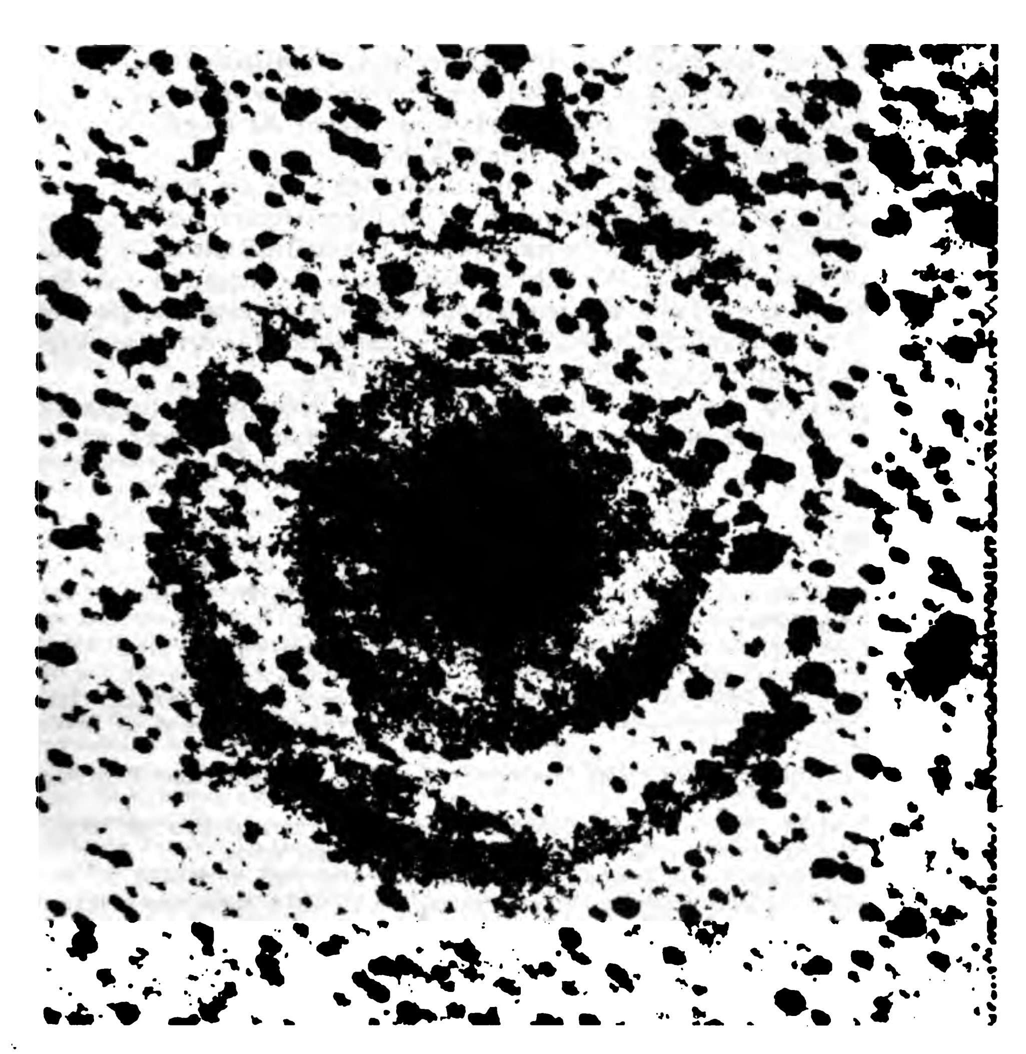


Bild 19 ESO-Aufnahme der optischen Lichtechos von SN 1987A am 16. März 1988 (C. Gouiffes, et al., 1988).

Fig. 19 CCD images of the optical light echos of SN 1987A with the ESO 3,6 m telescope on March 16, 1988 (C. Gouiffes, et al., 1988).

Dort, wo dieses die interstellaren Gasschichten schneidet, zeigen sich die Ringe, deren Positionen man aus den Beobachtungen bestimmen kann. Als Kuriosität sei erwähnt, dass sich die beiden ausgeprägten Ringe in Bild 19 mit scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit bewegen. Die scheinbare Geschwindigkeit des äusseren Ringes beträgt sogar 21,5 c. Dieses Beispiel zeigt, dass es wohl auch bei anderweitig beobachteten scheinbaren Überlichtgeschwindigkeiten (Jets von aktiven Galaxien) in der Astronomie mit rechten Dingen zugeht.

Leider konnten am 23. Februar 1987 keine Gravitationswellen nachgewiesen werden. Dies wäre mit den existierenden Detektoren vielleicht gerade noch möglich gewesen, aber unglücklicherweise waren die empfindlichsten Geräte zu diesem Zeitpunkt alle nicht tiefgekühlt.

Was haben wir von SN 1987A bereits gelernt? Ich halte die gute Übereinstimmung der theoretischen Erwartungen für die Eigenschaften des Neutrinopulses mit den Beobachtungen in Kamiokande II und IMB als das weitaus bemerkenswerteste Ergebnis. Wir haben gesehen, dass die integrierte Zahl der Neutrinoereignisse als Funktion der Zeit, die mittlere Neutrinoenergie und die totale Neutrinoluminosität durch das Standardmodell für den Core-Kollaps und die Neutronensternbildung gut erklärt werden.

Nun warten wir alle auf das definitive Erscheinen eines Neutronensterns. Oder wurde vielleicht trotz allem doch ein Schwarzes Loch gebildet?

11 Literatur

Burrows, A. (1988), Neutrinos from Supernovae. To appear in SUPERNOVAE, ed. by A. G. Petschek, Springer-Verlag, to appear.

Clark, D. H., und Stephenson, F. R. (1977), The Historical Supernovae. Pergamon Press.

Gouiffes, C., et al. (1988), Light Echos from SN 1987A, ESO Scientific Preprint no. 591.

Koshiba, M. (1987), in «SN 1987A», ESO Workshop, Ed. I. J. Danziger, ESO Proceedings, p. 219.

Mayle, R. W. (1985), Physical Processes in Collapse Driven Supernova. Dissertation, UC Berkeley.

Nomoto, K., und Hashimoto, M. (1988), Presupernova Evolution of Massive Stars. Phys. Rep. *163*, p. 13.

Straumann, N. (1989), Physics of Typ II Supernova Explosions. Lectures given at the XXVII. Internationale Universitätswochen für Kernphysik (1988). Springer Verlag.

Trimble, V. (1988), The Greatest Supernova since Kepler. Rev. Mod. Phys. *60*, 859–871.

Trümper, J. (1989), Zeitlicher Abfall der Röntgenstrahlung von SN 1987A. Sterne und Weltraum, *3*, 144–145.

Woosley, S. E. (1988), SN 1987A: After the Peak. Astrophys. J. *330*, 218–253.

Prof. Dr. N. Straumann, Institut für theoretische Physik der Universität Zürich, Schönberggasse 9, CH-8001 Zürich

‹rolog

d Escher
1988

ıd Escher durfte glückliche Jugendjahre im Hause seiner stets hochverehrten Eltern verbrin-
lie ihn zu Ehr- und Redlichkeit, Fleiss und Arbeit erzogen. Auf Wunsch des Vaters, eines
ilologen, durchlief er, obschon den Sprachen nicht sonderlich zugeneigt, den altsprach-
Zweig des damals noch ungeteilten Gymnasiums an der Rämistrasse in Zürich. Nach dem
ım der Naturwissenschaften an der hiesigen Universität wurde er im Jahre 1925 mit einer
gischen Arbeit zum Dr. phil. II promoviert. Eine anschliessende Studienreise führte ihn
Ceylon und Indien, die dem jungen Zoologen eine willkommene Erweiterung seiner Kennt-
bot. Doch nach der Rückkehr stellte sich für ihn die Frage: Forschung und akademische
ahn oder Lehre und Unterricht an der Mittelschule? Seine reichen Geistesgaben und Fähig-
betrachtete er stets als dankbar angenommenes Erbe seiner Vorfahren und als Geschenk
chicksals; sie weiterzugeben an seine Mitmenschen war ihm Pflicht, ihr nachzuleben führte
ım Beruf des Lehrers. Spezialisierung auf ein enges Fachgebiet konnte ihn nicht locken, sei-
nfassenden Naturfreude schien die Arbeit auf der Mittelschulstufe näherzuliegen. Als er im
irdienst als junger Offizier seine Freude an der Führung und Ausbildung der ihm unterstell-
ekruten entdeckte, wurde er in seiner Berufswahl erst recht bestärkt.
ach bedrückenden Jahren des Wartens, der Annahme von Vikariaten und Hilfslehrerstellen,
Konrad Escher 1932 zum Professor für Biologie, damals Naturkunde genannt, an der Kan-
chule Zürich gewählt. Mit ihm kam ein völlig neuer, frischer Zug in den Biologieunterricht
ymnasiums, der beispielgebend nicht nur auf seine näheren Fachkollegen, sondern auch
die Kantonsgrenzen hinaus wirkte. Vorbei war es mit der wochenlangen Besprechung des
ıwurms, des Amphioxus oder des Süsswasserfisches, nicht Tafelbilder und Gipsmodelle
n im Zentrum des Unterrichts stehen, sondern frische Pflanzen und lebende Tiere. Frühmor-
fuhr er hinaus in die Umgebung der Stadt, um mit einem Armvoll Pflanzen vom Wiesenrand
einem Ast mit Kirschblüten zurückzukehren, oder er ruderte auf den See hinaus und holte
nit einem Planktonnetz Proben von Kleinlebewesen des Wassers herauf, um an ihnen funda-
ale biologische Gesetze und Einsichten zu erarbeiten. Nur ältere Semester werden sich erin-
welche Offenbarung die Einführung des Mikroskops und der Binokularlupe in die Schul-
brachte, welche neue Welt sich ihnen auftat beim Beobachten des pulsierenden Herzens ei-
Vasserflohs, des Beutefangs eines Süsswasserpolypen, der Blutzirkulation im Schwanz einer
quappe, der Peristaltik im Darm eines Tubifex. Das Staunen über die an Wunder grenzen-
Einrichtungen der Lebewesen, ihre Art zu erhalten, über die immer wieder erfundenen Stra-
zum Überleben, vor allem aber die Ehrfurcht vor dem Leben auf seine Schüler zu übertra-
aren ihm ein tiefstes Anliegen. Meisterhaft waren jene Stunden, in denen Bau und Funktio-
les menschlichen Körpers erörtert wurden, Stunden, die manchen bewogen haben mögen,

später das Studium der Medizin zu ergreifen. Wenn Konrad Escher den Schülern Wissen und Kenntnisse, Verständnis und Urteilsvermögen, Freude an der Natur und ihren Geschöpfen beibrachte, so erschöpfte sich damit seine Tätigkeit keineswegs. Er erinnerte sich an seine eigene Gymnasialzeit, die, wie er gestand, die unglücklichste Periode seines Lebens gewesen sei, weil er unter der Unnahbarkeit, Verständnislosigkeit und unpersönlichen Kälte seiner Lehrer schwer gelitten hatte. Er wollte es besser machen! Wenn immer ein Schüler Schwierigkeiten hatte, in seinen Leistungen zurückging oder plötzlich ein abwegiges Verhalten zeigte, fand er Zeit zu einem vertraulichen und meistens helfenden Gespräch. Konrad Escher, dem die Gründung einer eigenen Familie versagt geblieben war, brachte nunmehr seine grosse väterliche Güte und sein Verständnis den Bedrängten entgegen und stand ihnen mit gutem Rat und Hilfe bei. Die gleiche Anteilnahme am persönlichen Schicksal bewies er auch gegenüber seinen Kameraden vom Aktivdienst, mit denen er über all die Jahre hinweg freundliche Beziehungen aufrechterhielt.

In seinem Ruhestand widmete Konrad Escher seine ungebrochene Schaffenskraft dem Naturschutz und seinen Bedürfnissen. Seine beratende, aber auch helfende Stimme wurde in allen Kreisen, denen die Erhaltung unserer Natur ein Anliegen ist, hoch geschätzt; viele Jahre war er ein prominentes Mitglied der kantonalen und der eidgenössischen Natur- und Heimatschutzkommission, in jahrelanger, sorgfältiger Detailaufnahmetätigkeit erstellte er ein Inventar sämtlicher Feuchtstellen des Kantons mit den dort lebenden Amphibien. Was der Naturschutz der offenen Hand Konrad Eschers zu verdanken hat, ist nur Eingeweihten bekannt. Als vor zwei Jahren eine Festschrift zur Jahrhundertfeier der Quaianlagen geplant war und sich der Stadtrat als zugeknöpft erwies, steuerte Konrad Escher einen namhaften Betrag bei, um das Vorhaben zu ermöglichen. Er tat es mit Freuden zum Andenken an den von ihm hochverehrten Grossvater, den Quaiingenieur Arnold Bürkli.

In den letzten Jahren wurde seine Stimmung angesichts des Niedergangs unserer Zivilisation, des soziologischen Zerfalls und der drohenden ökologischen Katastrophe immer trüber. Nach kurzer Krankheit erlöste ihn der Tod von seiner Lebensmüdigkeit.

Konrad Escher war ein grossartiger Lehrer, ein edler, vornehmer, gütiger Mensch, ein hilfsbereiter Kollege, ein treuer Freund. Fritz Slowik

:sprechung

'eitzmann, Franz auf der Maur: Ge-
e bestimmen und verstehen – Ein Füh-
lurch die Schweiz. Birkhäuser Verlag
l, Boston, Berlin, 1989. 231 S. Preis
4.–.

er nicht zum ersten Mal, dass ein Buch
ulāre Art eine Einführung in den geo-
n Aufbau der Schweiz zu geben ver-
)en Autoren gelingt es hier jedoch in
:rer Weise, viel Information – Basiswis-
Details – anschaulich und dennoch
:packt vorzustellen. Vielleicht wird ein
ınz am Anfang von der Geschichte ei-
ner Findlings überrollt, doch die Ge-
se werden in den folgenden Kapiteln
ıd nach gelüftet. Die Gliederung des
ist übersichtlich und auch für Geolo-
linge günstig gewählt: Nachdem eine
ber prägnante Einführung in allgemei-
ogische Prozesse gegeben wird, kom-
e wichtigsten Gesteine der Schweiz
.er Reihe nach zur Erläuterung. Ange-
›ei magmatischen Tiefengesteinen über
te, klastische Sedimente (Trümmerge-
Karbonate und Evaporite (Dolomit,
s hin zu den verschiedensten Metamor-
(Umwandlungsgesteine) werden aus-
deren Bildungsumstände, Verwen-
öglichkeiten und Vorkommen be-
:n.
Überblick über die wichtigsten ge-
ldenden Mineralarten ist kurz, präg-
ıd für Laien mit angenehm wenigen
:hen Formeln versehen. Verwirrend ist
gs die Verwechslung des Blauschiefer-
ımphibols Glaukophan mit Glaukonit.
kleine Werk ist reich bebildert. Bei ih-
'ensichtlichen Bestreben nach der Ab-
«gewöhnlicher» Minerale und Ge-
ılso nicht von Museumsstufen (die der
ohnehin nie finden wird), ist den Auto-
ır manch gutes Bild gelungen; einige
ie etwa der Bergeller Granit, die Koral-
St-Ursanne oder der Pegmatit von Bris-
ıd reichlich unglücklich gewählt. Schön
für die zahlreichen Exkursionsvorschlä-
/or allem auch für gemütliche Wochen-
m Familienkreis gedacht sind. Gerade
leckungsfreudige Kinder ist eine geziel-
derung, wo auch mit Bestimmtheit ein
schönes Gestein oder ein Fossil gefunden werden kann, ein Erlebnis. Aber auch dem Erwachsenen – egal ob Laie oder Hobbygeologe – werden sich die Schweizer Landschaftsformen aus einer ganz neuen Blickrichtung zeigen. Der Teil über die Bodenschätze der Schweiz ist historisch bedingt etwas nostalgisch angehaucht, weshalb sicher besonders hier einiges an Neugierde geweckt werden kann, wie ja auch der in den letzten Jahren aufgekommene Bergwerkstourismus zeigt. Trotz aller Euphorie über das Vorhandensein von Rohstoffreserven in Krisenzeiten darf doch nicht übersehen werden, dass auch dann ein Abbau infolge der oft starken tektonischen Zerstückelung sehr mühsam würde. Salz, Sand, Kies, Schotter und Bausteine sind geologische Produkte der Schweiz, die nach wie vor noch grossmassstäblich ausgebeutet werden. Beim Schotterabbau gerät man jedoch zusehends in Konflikt mit dem Landschafts- und Grundwasserschutz, wie auch im Büchlein erläutert wird. Am Schluss der Lektüre, die übrigens auch durch ihr «feldtauglich» handliches Format besticht, werden einige (vielleicht etwas zu wenige) Fachausdrücke erklärt. Ferner finden sich einige gut ausgewählte Literaturangaben sowie ein vielleicht etwas zu kurz geratener Abschnitt über die Autoren, die beide eine geologische Ausbildung genossen haben. Eine geologische Zeittabelle neueren Standes, die sehr übersichtlich dargestellt ist, sowie ein ebenfalls guter tektonischer Überblick finden sich auf den Innenseiten der beiden Buchdekkel.

Das gesamte Werk gefällt durch seinen Aufbau, die Wahl der Beispiele und nicht zuletzt durch eine angenehm zu lesende Schriftart und -grösse. Es kann allen Geologie-Interessierten und denen, die's noch werden wollen, sehr empfohlen werden.

T. Bolliger

Vorstand der Naturforschenden Gesellschaft Zürich 1989/90

Präsidentin:
PD Dr. Irene Tobler-Kost
Pharmakologisches Inst.
Universität Zürich
Gloriastrasse 32
8006 Zürich, Tel. 257 26 82

Vizepräsident:
Prof. Dr. Stephan Müller
Inst. für Geophysik ETH
ETH Hönggerberg
8093 Zürich, Tel. 377 26 10

Aktuarin:
Elisabeth Rufener, lic. phil. I
Baltenswilerstrasse 28
8303 Bassersdorf
Tel. 836 75 31

Quästor:
Ferdinand Stutz
Finanz- und Treuhand AG
Chrottenbuckstrasse
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 23 58

Redaktor:
Prof. Dr. H. H. Bosshard
Inst. für Wald- und Holzforschung ETH
Schmelzbergstrasse 25
8092 Zürich, Tel. 256 32 27

Archivar:
Dr. Markus Schnitter
Zentralbibliothek
Zähringerplatz 6
8025 Zürich, Tel. 47 72 72

Beisitzer:
Dr. Heinrich Bührer
EAWAG/ETH
Überlandstrasse 133
8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85

Prof. Horst Dargel
Kantonsschule Rämibühl
Rämistrasse 56
8001 Zürich, Tel. 251 21 37

PD Dr. Erich Dubler
Anorganisch-chemisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 46 21

Prof. Dr. Andreas Gigon
Geobotanisches Inst. ETH
Zürichbergstrasse 38
8044 Zürich, Tel. 256 44 94

Prof. Dr. Klaus I. Itten
Geographisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 51 11

Prof. Dr. Elias Landolt
Geobotanisches Inst. ETH
Zürichbergstrasse 38
8044 Zürich, Tel. 256 43 30

Prof. Dr. Rolf Nöthiger
Zoologisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 48 61

PD Dr. med. Eugen Schönle
Universitäts-Kinderklinik
Steinwiesstrasse 75
8032 Zürich, Tel. 259 71 11

PD Dr. Hannes Schüepp
Eidg. Forschungsanstalt
für Obst-, Wein- und
Gartenbau
8820 Wädenswil, Tel. 783 63 15

Vertreter in der Kommission der Zentralbibliothek:
Prof. H. Dargel

Naturschutzaufgaben:
Prof. Dr. Andreas Gigon

Vertreter im Senat der SANW:
Dr. Heinrich Bührer

Rechnungsrevisoren:
Werner Kübler
Sägegasse 8
8702 Zollikon, Tel. 391 55 83

Mario Stolz
Bundtacherstrasse 5
8127 Forch, Tel. 980 07 80

Stellvertreter:
Dr. Andreas Fischer
Grundwiesstrasse 10
8700 Küsnacht, Tel. 910 69 26

134. Jahrgang 1989

VIERTELJAHRSSCHRIFT
R NATURFORSCHENDEN
SELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Inhaltsverzeichnis

Beiträge

Streiflichter aus Wissenschaft und Forschung

Berichte und Notizen

Briefe an den Herausgeber

Nekrolog

Buchbesprechungen

Neujahrsblatt auf das Jahr 1990 (192. Stück)

...utoren

...ript muss *druckreif* in Ma-
...t (1½zeilig auf einseitig be-
Papier vom Format A4) ein-
...den. Mit Rücksicht auf das
...en können Änderungen ge-
Manuskript bei der Korrek-
...hr ausgeführt werden. Die
...ss sich deshalb auf die Be-
...ner Setzfehler beschränken.
...e Wort- oder Textänderun-
...derungen von Formeln oder
...en dem Verfasser berechnet

...ipte sind wie folgt zu glie-

...Arbeit in Deutsch (Franzö-
Englisch)
und Namen der (oder des)
)
...fassung/Résumé/Summary
...örter)
Arbeit in Englisch (oder

Zusammenfassung (100–200

...schnitte unterteilt, mit kenn-
...n Untertiteln, die nach der
...ssifikation numeriert sind.

...e Adresse der (oder des)
)

...um Text
...ind im Text nicht hervorzu-

...gen einzelner Wörter (wis-
... Gattungs- und Artnamen)
...ursivsatz möglich. Die be-
...örter sind grün zu unterstrei-

...d unten auf die gleiche Ma-
zu schreiben und fortlau-
...erieren; im Text sind sie
...tsprechende, hochgestellte
...zeichnen.
..., unabhängig von den Bil-
...end zu numerieren, mit ei-
...gen Überschrift in Deutsch
...zu versehen und jeweils ein-
...n Blatt dem Manuskript bei-
...laufenden Text muss der
...ine Tabelle lauten: (Tabel-

Literatur:
Text sollen Literaturstellen
...eführt werden: (K. R. Pop-

Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild ...) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 134, Heft 4, Dezember 1989

Inhalt

Preis Fr. 15.–

Heft 1
Jahrgang 135
März 1990

VIERTELJAHRSSCHRIFT
R NATURFORSCHENDEN
SELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind von der Aktuarin der Naturforschenden Gesellschaft, *Frau Elisabeth Rufener, Baltenswilerstrasse 28, 8303 Bassersdorf*, zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 78.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich)*. – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042-5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/1*: 1–16

Hochtechnologie in der Medizin[1]

Peter Niederer, ETH Zürich

Das Ziel heutiger diagnostischer Methoden besteht grundsätzlich darin, einerseits eine wenig belastende, vorzugsweise nichtinvasive Anwendung am Patienten zu erlauben und andererseits eine krankheitsspezifische Aussage sicherzustellen. Ein unspezifischer und falscher Einsatz soll möglichst vermieden werden. Viele der zur Zeit zur Verfügung stehenden und noch in Entwicklung begriffenen Verfahren, welche diesen Forderungen nahekommen, sind wesentlich auf die Hochtechnologie angewiesen bzw. werden durch diese überhaupt erst möglich.

Am Beispiel der Computertomographie, medizinischen Anwendungen des Ultraschalles und neuer Verfahren der computerassistierten Röntgenbildauswertung wird die Bedeutung hochtechnologischer Verfahren gezeigt. Ebenso ergeben sich in der Therapie bessere Behandlungsmethoden dank der Hochtechnologie. Ein bekanntes Beispiel hiefür ist die Nierensteinzertrümmerung mit Hilfe mechanischer Stosswellen.

High Technology in Medicine

Present diagnostic methods are aimed on the one hand at allowing for a preferably noninvasive application and, on the other hand, at being specific for a certain disease. An unspecific and useless application should a priori be avoided. Many procedures which are available or still being further developed today and which fulfil these requirements to a high degree, are in essential need of high technology. In many cases a procedure could not even be envisaged without the use of high technology.

Computed tomography, ultrasound methods and new procedures of computerassisted evaluation of x-ray images serve as examples to document the importance of high technology. Furthermore, in therapy improved treatment methods become available due to the use of advanced technology. A well-known example for such a development is lithotripsy with the aid of mechanical shock waves.

1 Einleitung

Als der spätere Nobelpreisträger Cormack im Jahr 1963 seine erste Publikation über das grundlegende Prinzip der Computertomographie veröffentlichte, interessierte sich gemäss seinen eigenen Worten [A. M. Cormack, 1980] ausser dem Eidg. Lawinenforschungsinstitut Davos niemand für dieses Verfahren. Zehn Jahre später dagegen war die Wirkung der Arbeiten des ebenfalls mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Hounsfield, der unabhängig von Cormack auf dem Gebiete der Computertomographie gearbeitet hatte, explosionsartig und derart nachhaltig, dass der durch die Computertomographie eingeleitete gewaltige Fortschritt in der medizinischen Diagnostik gelegentlich in den Hintergrund tritt und die Computertomographie gewissermassen als «Standardprügelverfahren» einer scheinbar technisierten und teuren Spitzenmedizin dienen muss. Der eklatante Unterschied in der Wirkung der Arbeiten der beiden Forscher, deren medizinisch-technische Verdienste durch-

[1] Veränderte Fassung der Antrittsvorlesung vom 19. Januar 1989, ETH Zürich

aus vergleichbar sind, hat seinen Grund darin, dass Hounsfield eine klinikreife Maschine demonstrieren konnte [G. N. Hounsfield, 1981], während Cormack zehn Jahre früher lediglich einen vergleichsweise primitiven Laboraufbau zur Verfügung hatte. Hounsfield war in der Lage, diagnostisch aussagekräftige Querschnittsbilder des Kopfes herzustellen, Cormack erhielt dagegen «nur» Kurven, welche freilich physikalisch dasselbe bedeuteten, nämlich eine räumliche Verteilung von linearen Röntgenabsorptionskoeffizienten.

Für das vorliegende Thema von Bedeutung ist der Umstand, dass Hounsfield bei der Entwicklung seiner erfolgreichen Maschine in jeder Hinsicht auf die im Jahr 1973 in diesem Bereich zur Verfügung stehende Hochtechnologie angewiesen war und diese auch in konsequenter Weise einsetzte. Dazu gehören:

- Eine hochbelastbare Röntgenröhre mit einer bisher nicht erreichten (und auch nicht notwendigen) Stabilität: Beim ersten Experiment von Cormack dauerte die Datenaufnahme 9 Tage, da er unter anderem der Stabilität wegen eine Isotopenquelle verwendete. Ausserdem ist eine Isotopenquelle monochromatisch, was aus physikalischen Gründen von Vorteil ist. Eine solche erreicht aber nur viel tiefere Strahlungsintensitäten als eine Röntgenröhre. In den ersten Computertomographen dauerte die Datenaufnahme hauptsächlich dank verbesserter Röhrentechnik noch etwa 20 Minuten, und das Verfahren war damit klinikreif. Ein Problem bestand auch darin, dass die Röhre wegen der zusätzlich zur Rotation um den Körper notwendigen translatorischen Abtastung dauernd hin- und herbewegt werden musste, wobei an den Umkehrpunkten jeweils hohe Beschleunigungen auftraten.
- Ein Kristall/Photomultiplier/Vorverstärkersystem mit hoher Dynamik: Das Intensitätsverhältnis zwischen dem ungedämpften, direkten Messstrahl und dem mitten durch den Kopf verlaufenden Strahl beträgt mehr als 1000, und zur Lösung dieses Problems musste man zu Beginn einen Wasserhut verwenden, welcher um den zu messenden Kopf angebracht war und den direkten Strahl abschwächte.
- Die numerische Algorithmik und Prozessorkapazität: Zur Berechnung eines Querschnittes aus den Projektionen benötigte Cormack am Anfang einen ganzen Tag auf einer Grossrechenanlage, während dasselbe in der Maschine Hounsfields schliesslich noch einige Minuten auf einem Kleinrechner dauerte.
- Ein Bildschirm für die Bilddarstellung mit digitalem Grauwertspeicher, der mit Videogeschwindigkeit arbeitet: Die Computertomographie ist das erste medizinische Bildverfahren, bei dem das Bild computermässig erstellt und erst unmittelbar bei der Darstellung in analoge Form gewandelt wird.

Ohne diese technologischen Beiträge wäre es nicht möglich gewesen, ein für klinische Zwecke brauchbares Verfahren, insbesondere hinsichtlich der ntersuchungsdauer, bereitzustellen. Damit konnten zum ersten Male anatosch detaillierte Querschnitte im Hirn-Schädel-Bereich in vivo und nichtin-

vasiv hergestellt werden, was einem Durchbruch in der Diagnostik gleichkam. Bisher war die Untersuchung des Schädelinnern – im Gegensatz zu andern Körperregionen – technisch ein mehr oder weniger ungelöstes Problem. Soweit überhaupt möglich, waren Verfahren nur für beschränkte Fragestellungen gegeben (beispielsweise die Bestimmung der Mittellinienverschiebung mit Hilfe von Echo-Ultraschall) oder schwierig, teuer und schmerzhaft (beispielsweise die Pneumoencephalographie).

2 Medizintechnische Aspekte der Diagnostik und Therapie

Das Ziel heutiger diagnostischer Verfahren besteht grundsätzlich darin, eine wenig belastende und nichtinvasive Anwendung am Patienten zu ermöglichen. Die Methoden sollen dabei spezifisch sein, d.h. eine zuverlässige und differenzierte Diagnose liefern und dank klarer Indikationsstellung eine falsche Anwendung möglichst ausschliessen. Viele der heute zur Verfügung stehenden und immer noch in Entwicklung begriffenen Verfahren, welche einer solchen Forderung nahekommen, wurden und werden dank neuen Methoden der Hochtechnologie überhaupt erst realisierbar. Die folgenden Darstellungen sind keinesfalls vollständig; sie dürfen aber als besonders typische Beispiele für das Gesagte gelten.

2.1 Computertomographie

Als Folge der in den letzten zwanzig Jahren eingetretenen Entwicklungen im Bereiche der Hochtechnologie ist es nicht erstaunlich, dass sich die heutige Computertomographie gerade in den in der Einleitung aufgezählten Bereichen weiterentwickelt hat. Insbesondere ist die routinemässige Ganzkörpertomographie dank weiter verbesserter Röhrentechnik und leistungsfähiger Computer schneller geworden und bietet höhere Auflösung. Anstelle eines einzelnen Detektor-Photomultiplier-Vorverstärkerkanals wird heute eine integrierte Detektorenbank von mehreren hundert Detektoren eingesetzt, so dass mit einem fächerförmigen Strahlenbündel gearbeitet und eine gesamte Projektion gleichzeitig aufgenommen werden kann. Voraussetzung dafür ist, dass alle Messkanäle elektrisch äquivalent und genau abgestimmt sind, was fertigungstechnisch sehr heikel ist. Für die Bildaufnahme ist damit nur noch eine Rotation notwendig, und die translatorische Hin- und Herbewegung, welche die erwähnten hohen Beschleunigungen an den Umkehrpunkten bewirkte, wurde hinfällig und damit das Verfahren viel schneller. Heute dauert eine Bildaufnahme minimal weniger als 2,5 sec. Wird statt einer Röntgenröhre ein raschumlaufender Elektronenstrahl zur Erzeugung eines Röntgenstrahlfächers eingesetzt, kann auch auf die Rotation verzichtet und Querschnittsbilder können mit einer Frequenz von 50 Bildern/sec. hergestellt werden (Ciné-CT. [M. J. Lipton, 1985]). Diese Entwicklung fand vor allem im Hinblick auf die Bedürfnisse in der Kardiologie statt.

Falls ganze Bildstapel zur Verfügung stehen, sind räumliche Bildaufbereitungen bezüglich kontrastreicher, insbesondere knöcherner Strukturen möglich (Bild 1). Für die Orthopädie, Wiederherstellungs- und plastische Chirurgie sowie für die Unfallchirurgie bringen solche Methoden enorme Vorteile, etwa für die Operationsplanung. Die Segmentierung. d.h. die Berechnung und Darstellung der umhüllenden Fläche einer räumlichen Struktur in Computertomographie- und insbesondere auch Magnetresonanzbildern bezüglich Weichteilen mit schwächerem Kontrast, stellt dagegen ein Problem dar, an dem momentan intensiv gearbeitet wird.

Bild 1 Aus computertomographischen Transversalschnitten durch Segmentierung erzeugte Darstellung des knöchernen Schädels (Philips Medical AG., Zürich).

Fig. 1 3-dimensional representation of the skull, obtained from transverse CT-sections by segmentation.

2.2 Magnetresonanz-Tomographie

Bei der Magnetresonanz-Tomographie wird die Eigenschaft gewisser Atomkerne ausgenützt, welche ein von Null verschiedenes magnetisches Moment besitzen [P. Boesiger, 1985]. In einem äusseren Magnetfeld führen die Drehimpulse dieser Kerne kreiselähnliche Präzessionsbewegungen aus. Ist das Magnetfeld einerseits genügend stark und hat andererseits eine genau definierte räumliche Verteilung, können die Signale der Präzessionsbewegung nach einer kontrollierten Anregung gemessen und daraus Körperquerschnitte rekonstruiert werden. Das Verfahren ist völlig ungefährlich und hat zudem den grossen Vorteil, dass Schnitte in beliebiger Richtung gelegt werden können. An der Stelle eines Atomkerns wird das für die erwähnte Präzession massgebende äussere Magnetfeld zusätzlich durch die lokale Verteilung der umgebenden Atome, d.h. durch die chemische Umgebung, beeinflusst, weshalb im nzip auch eine chemische Analyse des Körperinnern auf spektroskopischer is möglich ist. Man spricht dann von Magnetresonanzspektroskopie.

3 Ultraschall und Strömungsanalyse in Blutgefässen

medizinischen Anwendungen des Ultraschalls wird seit einigen Jahren von
›r aus der Radartechnik bekannten Methode der phasengesteuerten Anten-
›n Gebrauch gemacht. Im Falle des Ultraschalls besteht die Antenne bzw.
›r Transducer aus einem piezoelektrischen Plättchen, welches in Segmente
ıterteilt ist, von denen jedes mit veränderlicher zeitlicher Verzögerung ange-
gt wird, so dass die Ausbreitungsrichtung der entstehenden Wellenfront oh-
: Bewegung des Transducers verändert werden kann. Auf diese Weise kön-
›n im On-line-Verfahren Körperschnitte erzeugt werden. Mit Hilfe der Pha-
nsteuerung ist auch eine Fokussierung des Strahles, in der Empfangsphase
gar eine dynamische Fokussierung, d.h. ein Nachführen des Fokus mit
:hallgeschwindigkeit, möglich [U. Moser, 1988]. Je feiner theoretisch die Un-
rteilung des Transducerplättchens ist, um so besser kann die Strahlcharakte-
ıtik geformt werden. Kleinere Segmente haben aber nebst anderen Proble-
en auch eine kleinere elektrische Impedanz, weshalb unter anderem Schwie-
;keiten mit der Anregung entstehen können. Die Herstellung hochwertiger
ltraschalltransducer stellt deshalb eine ausgesprochene technische Speziali-
t dar, welche nebst elektronischen viele Kenntnisse material- und ferti-
ıngstechnischer Natur erfordert [S. Basler, 1989].

Durch Messung von Phasenverschiebungen der rückgestreuten Echos kön-
:n auch Dopplerfrequenzen und damit Bewegungen im Körperinnern, ins-
:sondere Strömungsgeschwindigkeiten von Blut, bestimmt werden. Eine An-
endung dieser Technik ist in Bild 2a gezeigt, wo das Strömungsverhalten in
:r Nierenarterie dokumentiert ist. Es handelt sich dabei um den zeitlichen
erlauf des Flusspulses, wie er durch das schlagende Herz in regelmässigen
ıtervallen von etwa 0,9 sec (in Ruhe) ausgelöst wird. In Bild 2b kommen
ıeoretische Vorhersagen [J. C. Stettler et al., 1981] aufgrund fluidmechani-
:her Strömungsmodelle zur Darstellung. Es handelt sich um einen Aus-
:hnitt aus einem umfangreicheren Modell des arteriellen Gefäss-Systems,
nd gezeigt sind berechnete Flusspulse in dem die Nierenarterien simulieren-
ıen Gefässabschnitt.

Die Berechnungen erfolgen aufgrund einer eindimensionalen Approxima-
ion der Navier-Stokes- und Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\varrho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{f}{\varrho S};$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (S \cdot v)}{\partial z} = 0;$$

/o

(z, t) die mittlere achsiale Strömungsgeschwindigkeit des Blutes (Dichte ϱ) im interessierenden Gefässabschnitt als Funktion der Zeit t und der Distanz z,

p (z, t) den Druck und
S (z, t) den Gefässquerschnitt bedeuten.

Es erweist sich für eine realistische Simulation als wichtig, die Dämpfungseigenschaften aufgrund von Reibungseffekten zu berücksichtigen. Diese bestehen aus der viskoelastischen Dämpfung der Gefässwände sowie aus der durch die Viskosität des Blutes verursachten Dämpfung und gehen in die Funktion S (z, t) bzw. den viskosen Reibungsterm f ein [P. Niederer, 1985]. Der Einfluss von Gefässverzweigungen muss ebenfalls mit in die Modellierung einbezogen werden. Die theoretischen Rechnungen sowie die Messun-

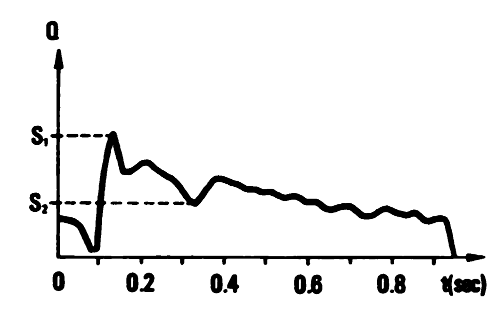


Bild 2a Mit Hilfe der Ultraschall-Dopplertechnik gemessener zeitlicher Verlauf des Flusspulses [Q(t)] in einer normalen Nierenarterie [PD Dr. R. Jenni, Med. Poliklinik, Universitätsspital Zürich].

Fig. 2a Shape of flow pulse [Q(t)] in a normal renal artery as measured with Doppler-ultrasound.

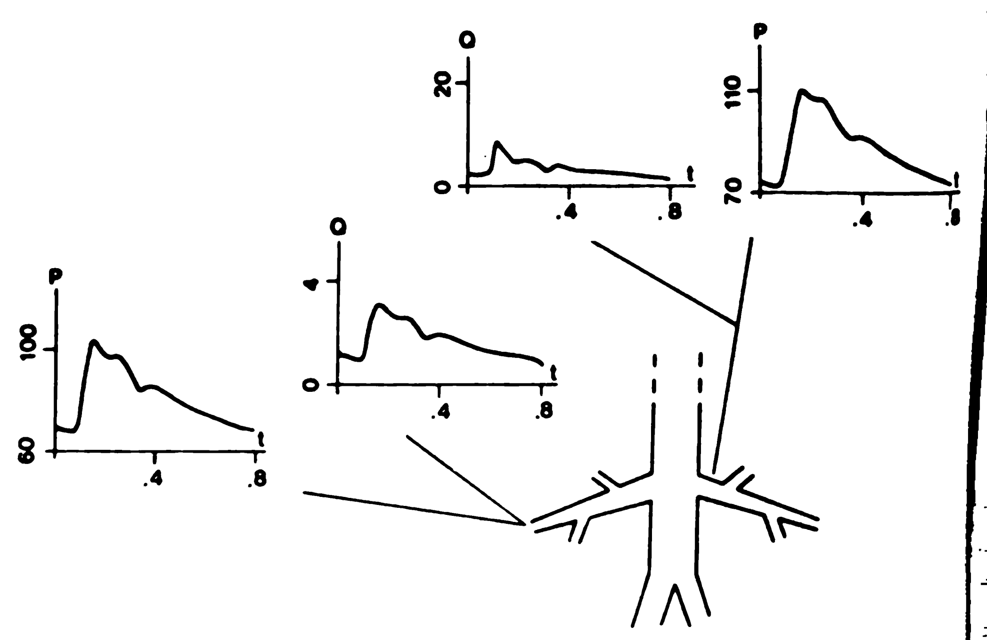


Bild 2b Mathematische Simulation der in der Figur 2a gezeigten Flusspulse aufgrund fluidmechanischer Gesetze.

Fig. 2b Mathematical simulation of the flow pulse shown in fig. 2a on the basis of the fluid mechanical laws.

gen zeigen eine gute Übereinstimmung, woraus folgt, dass die hämodynamischen Modellvorstellungen bezüglich der Nierenperfusion physikalisch richtig sind. Das klinisch wichtige Problem der Durchgängigkeit der Nierenarterie kann also mit Ultraschall ohne Belastung für den Patienten abgeklärt werden.

Eines der Ziele neuerer Entwicklungen auf dem Gebiet der Ultraschalldopplertechnik besteht darin, die Strömungsverhältnisse in der ansteigenden Aorta so gut zu erfassen, dass das Schlagvolumen des Herzens mit dieser Methode und damit nichtinvasiv gemessen werden kann. Das Problem besteht darin, dass wesentliche Asymmetrien in der Geschwindigkeitsverteilung im ansteigenden Ast der Aorta vorhanden sein können, wie Bild 3 zeigt. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn wie in dem in der Figur gezeigten Fall ein pathologischer Zustand vorliegt. Es handelt sich um Messungen an einem Patienten mit undichten Aortenklappen, wo ein Teil des ausgeworfenen Blutes wieder in das Herz zurückfliesst und ausserordentlich unregelmässige Strömungsverhältnisse bestehen. In solchen Fällen wird nur eine volle zweidimensionale Erfassung des Geschwindigkeitsprofiles zum Ziele führen.

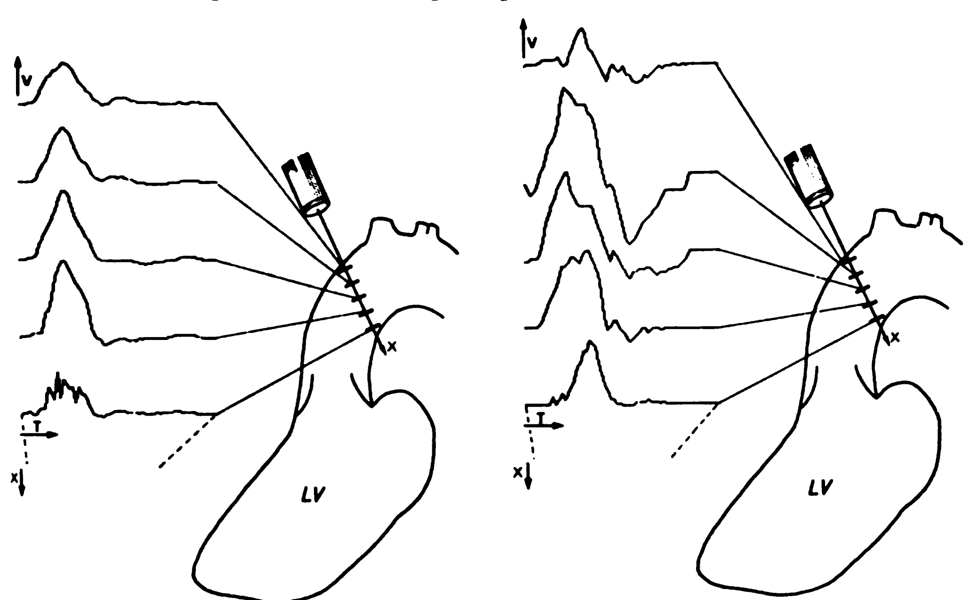


Bild 3 Strömungsverhältnisse im ansteigenden Ast der Aorta (LV: linkes Ventrikel). Gezeigt sind die zeitlichen Geschwindigkeitsprofile eines Pulses an verschiedenen Stellen des Gefässquerschnittes, aufgenommen entlang eines Gefässdurchmessers mit Hilfe eines mehrkanaligen Ultraschalldopplergerätes. a: Normale Geschwindigkeitsverteilung, b: Gestörte Strömungsverhältnisse bei Aortenklappeninsuffizienz mit teilweisem Rückfluss des Blutes in das Herz [PD Dr. R. Jenni, Med. Poliklinik, Universitätsspital Zürich].

Fig. 3 Flow characteristics in the ascending aorta (LV: left ventricle). The shapes of the flow pulse are exhibited at various locations along a vessel diameter. The measurements were made with a multichannel Doppler-flowmeter. a: Normal velocity distribution, b: Disturbed flow patterns in case of aortic valve insufficiency with partial backflow of the blood into the heart.

2.4 Spezielle Röntgenverfahren in der Kardiologie

Blutgefässe und die Herzhöhlen lassen sich röntgenographisch nur darstellen, wenn sie mit einem geeigneten Kontrastmittel gefüllt sind. In der Regel erfolgt die Injektion des Kontrastmittels lokal an die abzubildende Stelle. Falls es sich um einen arteriellen Abschnitt oder die linke Herzkammer handelt, muss also arteriell katheterisiert werden. Besonders wichtig, wegen der raschen Bewegung des Herzens aber auch technisch besonders heikel ist die Darstellung von Herzkranzgefässen, welche bei Patienten mit koronarer Herzkrankheit pathologische Verengungen aufweisen können. Um keinen Verlust der im primären Röntgenstrahlenbild enthaltenen Information zu erleiden, wird der Bildverstärkerausgang mit dem konventionellen 35 mm schwarzweiss Kinofilm und einer Bildfrequenz von 50Hz aufgenommen. (Die Bildqualität des Standard-Fernsehens wäre in gewissen Fällen ungenügend.) Die Bilder werden nach Entwicklung des Filmes computermässig erfasst und ausgewertet. Dank neu entwickelter Berechnungsmethoden ist man in der Lage, Einengungen von Herzkranzgefässen, wie in Bild 4 ersichtlich, auch vor einem unregelmässigen Hintergrund und bei relativ schwachem Kontrast automatisch und quantitativ zu vermessen. Die Digitalisierung von Bildern hoher Auflösung und Grauwertdynamik geschieht mit Hilfe eines sog. «slowscan»-Verfahrens, wofür an der Medizinischen Poliklinik des Universitätsspitals Zürich eine Kamera eingesetzt wird, in welcher ein eindimensionaler CCD-Array mit 2000 Elementen über das Bild fährt. Jedes dieser Elemente erzeugt eine zur einfallenden Lichtmenge proportionale elektrische Ladung. Um eine Grauwertauflösung von 12 bit zu erhalten, ist der Chip auf −10° gekühlt, was das Rauschen entsprechend vermindert. (Die Entwicklung der Kamera erfolgte am Institut für Biomedizinische Technik und Medizinische Informatik der Universität und der ETH Zürich [Th. Leemann, 1986].)

Bild 4 Computerassistierte Vermessung einer Verengung eines Herzkranzgefässes.

Fig. 4 Computerassisted measurement of a coronary stenosis.

Einfacher und für den Patienten weniger belastend ist es, wenn das Röntgenkontrastmittel in eine zentrale Vene injiziert werden kann, auch wenn ein arterieller Gefässabschnitt oder die linke Herzkammer zu untersuchen ist. Durch die nach dem Durchgang durch die rechte Herzseite folgende Lungenpassage wird das Kontrastmittel zwar verdünnt, aber es erscheint schliesslich auf der arteriellen Seite. In jedem Fall entsteht jedoch ein zu geringer Röntgenkontrast für eine zuverlässige Befundung. Es ist allerdings schon seit über 50 Jahren bekannt, dass mit Hilfe von Bildsubtraktionsverfahren eine Kontrastverstärkung erreicht wird. Zu diesem Zwecke subtrahiert man von dem mit verdünntem Kontrastmittel entstehenden Bild eine Aufnahme derselben Körperstelle, welche vor der venösen Kontrastmittelinjektion entsteht. Unter der Voraussetzung, dass sich der Patient zwischen den beiden Aufnahmen nicht bewegt, bleibt nach der Subtraktion nur noch ein Bild des Kontrastmittels übrig, und alle störende Hintergrundinformation verschwindet. Dieses Verfahren lässt sich rein photographisch durch Überdecken und Umkopieren durchführen, heute kommen, wie in Bild 5 dargestellt, computerassistierte Methoden zum Einsatz [B. Birchler et al., 1985]. Zu beachten ist, dass mit der Kontrastverstärkung auch das Rauschen verstärkt wird. In kritischen Fällen, wie bei der Darstellung der sich rasch bewegenden Herzhöhlen, ist man deshalb auf eine besonders rauscharme Bildverarbeitung angewiesen. Nach Subtraktion erhält man eine einwandfreie Darstellung der linken Herzkammer, des Vorhofes und der ansteigenden Aorta. Bei zeitverschobener Subtraktion (Bild 6) kommen die Myokardbewegungen zur Darstellung. Kontrahierende Strukturen erscheinen weiss, dilatierende schwarz. Während sich das linke Ventrikel kontrahiert, dilatiert sich gleichzeitig der Vorhof. Deutlich manifestieren sich durch fehlende Darstellung diejenigen Regionen des linken Herzmuskels, welche wegen eines Herzinfarktes nicht mehr kontraktionsfähig

Bild 5 Subtraktionsdarstellung der linken Herzkammer bei venöser Injektion des Röntgenkontrastmittels. a: vor, b: nach Subtraktion.

Fig. 5 Masked mode subtraction of left ventricle following intravenous administration of contrast agent. a: before, b: after subtraction.

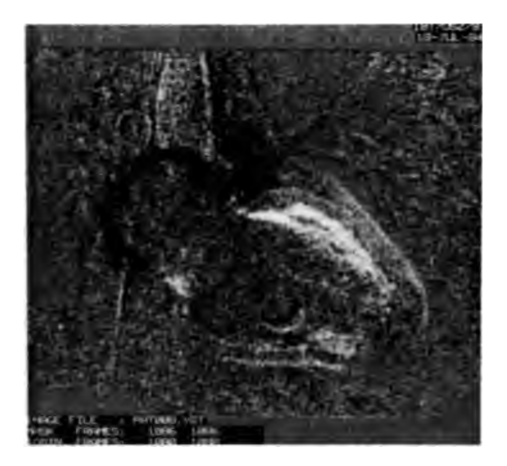


Bild 6 Zeitverschobene Subtraktion von Röntgenprojektionen des Herzens. Sichtbar werden dadurch nur die bewegten Strukturen, welche mit Röntgenkontrastmittel gefüllt sind: während der Kontraktion der linken Herzkammer (helle Umrisse) dilatiert sich der linke Vorhof (dunkler Umriss). Der Umriss der linken Herzkammer ist an denjenigen Stellen unterbrochen, an denen der Herzmuskel infolge Herzinfarkt seine Kontraktionsfähigkeit verloren hat. Andeutungsweise ist auch die Wanddicke der linken Herzkammer sichtbar. Das starke Bildrauschen (Quantenrauschen) ist auf die als Folge der Bildsubtraktion resultierende Kontrastverstärkung zurückzuführen. Dieses wird in Kauf genommen, um mit möglichst geringer Strahlendosis arbeiten zu können.

Fig. 6 Time interval difference of x-ray projections of the heart. With this technique only those structures filled with contrast agent become visible which undergo a displacement. During the contraction of the left ventricle (bright contour) the left atrium dilates (dark contour). The contour of the left ventricle is discontinuous at those locations where the muscle has lost its contractility due to infarction. Furthermore, the wall thickness is partially indicated. The relatively strong noise (quantum noise) is a consequence oft the contrast enhancement of the subtraction process. This is taken into account in order to minimize the radiation dose.

sind. Auch die Dicke des Herzmuskels ist andeutungsweise erkennbar. Dank der problemlosen venösen Katheterisierung können auch Untersuchungen während körperlicher Belastung durchgeführt werden, wobei Störungen der Herzwandbewegungen unter Umständen ausgeprägter zum Vorschein kommen als unter Ruhebedingungen.

Für den Kardiologen können die bei der Kontraktion des Herzmuskels entstehenden Wandspannungen von Bedeutung sein. Bei einer detaillierten Berechnung der Herzmuskeldynamik ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Wandmaterial anisotrop ist und eine ausgeprägte innere Orientierung hat. Die Fasern können dabei auch eine transmural, d.h. quer zur Wand, orientierte Komponente haben. Berechnet man den Flüssigkeitsdruckverlauf im Muskel in radialer Richtung unter Berücksichtigung transmuraler Faserverläufe mit dem Winkel η, entstehen die in Bild 7 gezeigten Kurven. Die Rechnung erfolgt aufgrund der Kontinuitätsgleichung (biologes Material ist inkompressibel) sowie des Impulssatzes in einer speziellen Formulierung für ein anisotropes, flüssigkeitsgefülltes Kontinuum. Man findet, gestrichelt angedeutet, dass

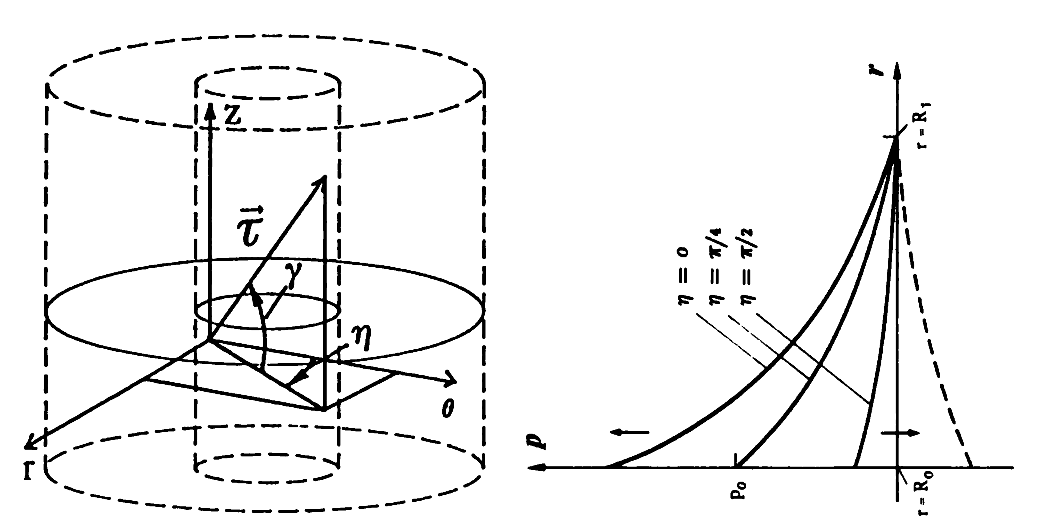


Bild 7 Radialer Verlauf des hydrostatischen Druckes in einem flüssigkeitsgefüllten transversal orthotropen Zylindermantel als Funktion der Richtung η der Orthotropieachse ($\vec{\tau}$: Orthotropieachse mit Richtungen η und γ, r: radiale Koordinate, R_o: innerer Radius des Zylinders, R_i: äusserer Radius, p_o: Innendruck). Mit zunehmendem Winkel η nähert sich der Verlauf der gestrichelt angedeuteten Kurve.

Fig. 7 Hydrostatic pressure in a fluid-filled orthotropic shell as function of the orientation angle η of the orthotropy axis. ($\vec{\tau}$: orthotropy axis with orientation angles η and γ, r: radial coordinate, R_o: inner radius of cylinder, R_i: outer radius, p_o: interior pressure). With increasing angle η the course of the pressure curve approaches the broken line.

für extreme Orientierungen kontrahierende Fasern sogar dilatierend auf die Herzkammer wirken können. Es erstaunt deshalb nicht, dass bei einer krankhaften, ungeordneten Faserstruktur in allen Richtungen, wie beispielsweise bei Patienten mit hypertropher occlusiver Kardiomyopathie (HOCM, Bild 8), technisch gesprochen der Wirkungsgrad des Herzens als Pumpe schlecht und der Muskel deshalb dauernd überbelastet ist.

2.5 Positronen-Emissions-Tomographie

Bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) wird die Positron-Elektron-Annihilationsstrahlung verwendet. Bei der Annihilation, d.h. der gegenseitigen Auslöschung dieser Teilchen, entstehen zwei γ-Quanten von je 511 keV, welche in entgegengesetzten Richtungen propagieren. Diese Eigenschaft lässt sich zur Lokalisation eines solchen Ereignisses im Körperinnern ausnutzen, indem mit Hilfe einer sogenannten Koinzidenzschaltung eines um den Körper angebrachten Detektorenrings gleichzeitig aus entgegengesetzten Richtungen eintreffende γ-Quanten detektiert werden. Für die Untersuchung wird dem Patienten ein Positron-emittierendes Isotop in einer geeigneten Verbindung, zum Beispiel Glucose, verabreicht, woraus sich funktionelle Hinwei-

Bild 8 Ungeordnete Faserstruktur bei einem kranken Herzmuskel. Die Wirkung der Kontraktion hebt sich zum Teil gegenseitig auf.

Fig. 8 Disorganized structure of fibres in a diseased heart muscle. The effect of the contraction is partially neutralized.

se beispielsweise in bezug auf Stoffwechselvorgänge im Hirn ergeben. Der Vorteil von PET besteht in der hohen Sensitivität, welche etwa 1000mal grösser ist als diejenige der Magnetresonanzspektroskopie.

2.6 Optische Verfahren

Dank immer dünner werdender lichtleitender Fasern eröffnen sich für optische Verfahren neue Möglichkeiten. Die kleinsten, heute zur Verfügung stehenden bildübertragenden Faserbündel sind nur noch 0,35 mm im Durchmesser. Anwendungsbereiche für Mikroendoskope auf der Basis solcher Fasern sind in der Ophthalmologie, in der Ohren-Nasen-Halsklinik, in der Orthopädie zur Gelenksinspektion oder in der Unfallmedizin denkbar und zu erwarten.

Eine neue optische Technik betrifft die computerunterstützte On-line-Vermessung auf photogrammetrischer Basis, beispielsweise zur Erfassung der ·erbewegungen bei Kaufunktionsstörungen. Weiterhin hat diese Technik utung erlangt in der Orthopädie für die Ganganalyse oder in der Trau-

matologie zur Analyse von Verletzungsvorgängen. Die mathematische Modellierung in Kombination mit Computergraphik (Bild 9) ist auf dem Gebiete der Bewegungsanalyse besonders wichtig, gleichermassen für die Zwecke der Orthopädie oder der Traumatologie, zum Verständnis der komplexen Vorgänge eines Systems von derart vielen Freiheitsgraden, wie sie der menschliche Körper besitzt. Zu diesem Zwecke sind Impuls- und Drallsatz für jeden Teilkörper zu formulieren und unter Berücksichtigung der äusseren Kräfte und der Nebenbedingungen in den Gelenken zu integrieren.

2.7 Mikrosensorik

Ein sich rasch entwickelndes, grosses Gebiet der biomedizinischen Technik betrifft die Mikrosensorik. Eine der vielen interessanten technischen Möglichkeiten, Mikrosensoren herzustellen, basiert auf der Methode der Ionen-selektiven Feldeffekt-Transistoren (ISFET). Bei einem Feldeffekt-Transistor steuert das elektrische Feld, welches sich am Tor befindet, den Strom zwischen den beiden stromführenden Anschlüssen. Falls dieses Feld durch Ionen bewirkt wird, entsteht ein Messelement, indem der Strom durch den Transistor direkt proportional zur Ionenkonzentration am Tor ist. In einer natürlichen biologischen Umgebung wie dem Blut befindet sich eine grosse Zahl verschiedener Ionen. Durch Anbringen einer dünnen Membran auf dem Tor,

Bild 9 Modell des menschlichen Körpers für die Bewegungsanalyse, bestehend aus 17 Teilsegmenten.

Fig. 9 Model of the human body for motion analysis purposes composed of 17 segments.

welche nur für eine bestimmte Sorte von Ionen durchlässig ist, entsteht eine Ionen-selektive Mess-Sonde. Das Prinzip ist an sich bereits etliche Jahre alt, ungelöst sind immer noch Probleme der Langzeitstabilität.

2.8 Funktionelle Untersuchungen

Alle bisher erwähnten Verfahren, mit Ausnahme der Mikrosensoren, sind in der einen oder anderen Form bildgebend. Zu ergänzen ist der wesentliche Umstand, dass in gewissen Fällen nicht nur bildliche, anatomisch-morphologische Information, sondern auch funktionelle Hinweise erhalten sind. Dies gilt insbesondere für die Magnetresonanzspektroskopie, welche im Prinzip eine Analyse gewisser Stoffwechselfunktionen ermöglicht. Bei PET handelt es sich in erster Linie um ein Instrument zur Abklärung beispielsweise von Hirnfunktionen, und die Bildgebung steht im Grunde nicht im Vordergrund. Sogar bei einem hauptsächlich bildgebenden Verfahren wie bei der erwähnten Variante der Koronarangiographie ist eine Schätzung der für den Kardiologen wichtigen koronaren Reservefunktion möglich, da es sich neuestens um ein quantitatives Verfahren handelt.

2.9 Therapeutische Verfahren

Die bisher erwähnten Methoden betrafen ausschliesslich die Diagnose. Auch in der Therapie haben aber Entwicklungen der Hochtechnologie Bedeutung. Zu erwähnen sind beispielsweise:

- Der Nierensteinzertrümmerer: Beim ursprünglichen Konzept der Firma Dornier pulverisiert eine mechanische Stosswelle den Stein. Verschiedene neuere und billigere Methoden sind und werden entwickelt. Beispielsweise lassen sich gewisse Steine durch einen lichtleitenden Katheter direkt kontaktieren. Ein Festkörperlaser im Q-switch-Betrieb erzeugt dann die zur Zerstörung des Steines notwendigen mechanischen Spannungen. Diese Entwicklungen werden unter anderem durch die bereits früher erwähnten Fortschritte in der Lichtleitertechnologie ermöglicht.
- Der Mikroruptor: Bereits seit einigen Jahren findet der Festkörperlaser im Q-switch-Betrieb in der Ophthalmologie Verwendung zur photodisruptiven Zerstörung von pathologischen Strukturen im Auge. Auch hier ergeben sich dank neuer, verbesserter Lichtleiter und Anwendungsstrategien neue therapeutische Möglichkeiten, insbesondere für die Behandlung des Glaucoms.
- Die direkte Stimulation des Hörnervs bei neurosensorisch tauben Patienten: Bei dieser Methode stimuliert eine im Innenohr plazierte Multi-Elektrode den Hörnerv. Die stimulierenden Pulssequenzen entstehen durch eine computerunterstützte Verarbeitung des zu übertragenden Signals in einem externen Sprachprozessor.

- Die Krebstherapie mit γ-Strahlung: Diese wurde früher u.a. mit dem bekannten Betatron erzeugt, einer schweizerischen Entwicklung bei BBC. Heute kommen in zunehmendem Masse sogenannte Linearbeschleuniger zum Einsatz.

3 Schlussbemerkungen

Die Frage der Kosten ist heute zweifellos von zentraler Bedeutung, um so mehr als die medizinische Spitzentechnologie häufig als wesentlich mitverantwortlich – wenn nicht sogar hauptverantwortlich – für übermässige Steigerungen der Kosten im Gesundheitswesen betrachtet wird.

Es wäre sicherlich abwegig, zu behaupten, medizinische Technik sei teurer als andere Technik. Die Aufgabe des biomedizinischen Ingenieurs besteht jedoch darin, mit Hilfe neuester Technologie bessere, billigere und kleinere Geräte mit geringen sekundären Kosten zu bauen, welche den Patienten möglichst wenig belasten und eine medizinisch spezifische Aussage ermöglichen bzw. im Fall therapeutischer Geräte eine spezifische und rasche Anwendung erlauben. Insbesondere soll die Möglichkeit oder sogar die Versuchung, etwa aus finanziellen Gründen, einer zu häufigen oder falschen Anwendung verringert werden. Kostensteigerungen andererseits, die darauf zurückzuführen sind, dass eine neue, bessere und weniger gefährliche Untersuchungsmethode - etwa die Computertomographie im Vergleich zur schmerzhaften und nicht ganz unproblematischen Pneumoencephalographie – mit weniger Zurückhaltung und deshalb häufiger eingesetzt wird, sollte man jedoch nicht grundsätzlich negativ beurteilen, denn hier liegt eine echte Leistungssteigerung des Gesundheitswesens vor.

Unzweckmässig ist das Bestreben, gute und bewährte, aber im Moment noch teure Methoden durch solche zu ersetzen, deren einziger Vorzug es ist, billig zu sein. Häufig wird bei solchen Bestrebungen auch auf Bedürfnisse der 3. Welt hingewiesen. Beispielsweise haben vor Jahren viele Leute versucht, die Ballistokardiographie als billiges Alternativverfahren in die Herzdiagnostik einzuführen. Bei dieser Methode sollten die durch die Bewegungen des Herzens erzeugten mechanischen Erschütterungen des ganzen Körpers, die leicht und auf billige Weise messbar sind, aufgezeichnet und analysiert werden. Dies ist zwar problemlos möglich, bereits elementare physikalische Überlegungen zeigen jedoch, dass daraus keine schlüssigen Hinweise auf die Herzfunktionen möglich sind. Trotzdem wurde ein erheblicher Forschungsaufwand betrieben. Heute spricht kaum noch jemand von Ballistokardiographie. Momentan gibt es Forschungsgruppen, die von der Impedanzcomputertomographie erwarten, dass diese die Röntgencomputertomographie oder MR-Bildgebung teilweise ersetzen könnte. Auch dies wäre ein sehr billiges Verfahren, aber auch hier zeigen bereits elementare physikalische Überlegungen, dass die Impedanz-CT höchstens in speziellen Fällen etwas bringen kann, et-

wa bei der Diagnostik von Lungenödemen. Die Gefahr solcher Billigmethoden besteht darin, dass aufgrund der schlechten Qualität der Ergebnisse eine abschliessende Diagnose in vielen Fällen nicht möglich ist. Es bleibt dann nichts anderes übrig, die scheinbar ersetzte, teure, aber taugliche Methode zusätzlich auch noch anzuwenden. Man erhält so eine Erhöhung der Kosten.

4 Literatur

Basler, S. (1989), Nichtinvasive Erfassung der Gewebsdurchblutung mittels Ultraschall. Diss. Nr. *8796* ETH Zürich.

Birchler, B., Hess, O. M., Murakami, T., Niederer, P., Anliker, M., Krayenbuehl, H. P. (1985), Comparison of intravenous digital subtraction cineangiocardiography with conventional contrast ventriculography for the determination of the left ventricular volume at rest and during exercise. Europ. Heart J. *6*, 497–409.

Boesiger, P. (1985), Kernspintomographie für die medizinische Diagnostik. Stuttgart (B. G. Teubner).

Cormack, A. M. (1980), Nobel Award Address, Early Two-Dimensional Reconstruction and Recent Topics Stemming from it. Med. Phys. *7*, 277–282.

Hounsfield, G. N. (1981), Nobel Lecture. Computed Medical Imaging. J. Radiol. *61*, 459–468.

Leemann, Th. (1986), Hochauflösende Digitalkamera für die Erfassung von quasistatischer Bildinformation. Diss. Nr. *8114* ETH Zürich.

Lipton, M. J. (1985), Quantitation of Cardiac Function by Ciné-CT. Radiol. Clin. North-Am. *23*, 613–626.

Moser, U. (1988), Inhärente Grenzen von Ultraschall-Blutflussmessverfahren. Diss. Nr. *8567* ETH Zürich.

Niederer, P. (1985), Damping Mechanism and Shock-Like Transitions in the Human Arterial Tree. J. Appl. Math. Phys. (ZAMP) *36*, 204–220.

Stettler, J. C., Niederer, P., Anliker, M. (1981), Theoretical Analysis of Arterial Hemodynamics Including the Influence of Bifurcations. Ann. Biomed. Eng. *9*, 145–175.

Institut für Biomedizinische Technik und Medizinische Informatik der
TH Zürich, Moussonstrasse 18, 8044 Zürich

rteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135*/1: 17–30

ɜgetationsgeschichte und Paläoklimatologie

ınradin A. Burga, Universität Zürich

kurzer wissenschaftshistorischer Überblick zur paläobotanischen und palynologischen Erforung Europas wird in der Einleitung dargelegt. Folgende Methoden dienen zur Erforschung Paläoklimas: Pollenanalyse, Dendrochronologie, Sauerstoffisotopenanalyse, CO_2-Analyse, tscherausdehnungen, Verwitterung, Erosion/Akkumulation, Löss-Stratigraphie, Schwermineen, Seespiegelschwankungen, planktonische Foraminiferen, Käfer-Nekrozönosen usw.

Es werden die wichtigsten Probleme zur Rekonstruktion der Paläovegetation bzw. des Paläoaas mit Hilfe der Pollenanalyse dargelegt. Folgende Punkte sind hierbei von Bedeutung: Naiche Sukzession, Bodenbildungen, Einwanderung von Pflanzen, Wandervermögen und -mögıkeiten, Konkurrenzverhalten, Höhenstufung der Vegetation.

Die spät- und postglazialen Klimaschwankungen in den Schweizer Alpen werden bezüglich Waldgrenz-Schwankungen seit dem Alleröd-Interstadial aufgezeigt. Während etwa 1000 Jahstieg in den westlichen Zentralalpen die Waldgrenze zu Beginn des Holozäns um etwa –600 Höhenmeter. Zur Zeit des postglazialen Wärmeoptimums befand sich die Waldgrenze 100–200 m höher als die heutige potentielle Lage. Der holozäne Klimarückschlag im Boreal ›erhalbstein-/Schams-/Venediger-Schwankung) ist in den Zentralalpen gekennzeichnet durch en massiven Arven-Rückgang für die Zeit von 8500–7200 v.h. Dieser Arvenrückgang, der in ıubünden, im Wallis, im Berner Oberland, im Salzkammergut, in den Hohen Tauern und im ıtirol sich abzeichnet, wird vor allem durch Frosttrocknis bedingt betrachtet.

Zum Schluss werden die Entwicklung des zentralalpinen Waldgürtels der Schweiz seit der äteiszeit und der Verlauf der klimatischen Schneegrenze zusammenfassend dargelegt.

getation History and Palaeoclimatology

ɛ introduction gives a short overview to the palaeobotanical and palynological research in ırope. The main important palaeoclimatological methods are the following: Pollen analysis, ndrochronology, oxygen isotopes analysis, CO_2 analysis, glacier oscillations, löss stratigraphy, ɜathering, erosion and accumulation of soils, sea/lake level fluctuations, planktonic foraminira, fossil beetles assemblages, etc. The main problems of palaeoecological reconstructions with ıllen analytical methods are discussed. The following points are important: Natural succession, ıil forming phases, plant immigration, immigration pathways and possibilities, concurrence, verɜal vegetation zonation.

Late Würmian and holocene Swiss alpine climate oscillations and timber-line fluctuations nce the Alleröd-Interstadial are discussed. In the western Central Alps the timber-line increased ıring 1000 years at the beginning of Holocene at about 500–600 m. During the post-glacial cliate optimum (Atlantic) the timber-line reached its highest extension at about 2300 m above sea vel, and the snow-line reached up to 3100 m. The most important climatic deterioration during e Boreal (8500–7200 years B.P.) is characterized in the Central Alps by a marked recession of *inus cembra* (Oberhalbstein-/Schams-/Venediger-Oscillation). This recession has been recorded several pollen diagrams in the Grisons, the Valais, the Bernese Alps, the Salzkammergut, the ohen Tauern, and the Southern Tyrol.

Boreal dry periods may explain the *Pinus cembra* recession as a result of frost dryness. At the ıd the paper gives an outline of the development of the Swiss central alpine forest belt and the ıow-line since the late Würmian.

1 Einleitung

«... toutes les choses de l'univers physique sont comme celles du monde moral, dans un mouvement continuel de variations successifes» schrieb 1778 Georges Louis Leclerc Graf von Buffon in den «Epoques de la Nature». Mit dieser Idee gehört Buffon nebst Hooke zu den ersten Paläoklimatologen, also den Erforschern des Klimas der Vorzeit.

Zur Rekonstruktion des Paläoklimas sind Klimazeugen, wie fossile Pflanzen, Tiere, Sedimente usw., besonders wichtig, seit den fünfziger Jahren aber auch vermehrt physikalische Datierungsmethoden.

Allen diesen Untersuchungen liegt das bekanntlich von Ch. Lyell 1830 begründete Aktualitätsprinzip zugrunde. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass mehrere Vorgänger denselben Grundgedanken mit etwas anderen Worten formuliert haben, wie z.B. der deutsche Physiker, Dichter und Goethe-Zeitgenosse G.C. Lichtenberg (1742–1799), der in seinen Aphorismen zu den Naturwissenschaften sagte: «Die geheimen Würkungen der Natur beurteilt man aus solchen ähnlichen, wo man sie auf der Tat ertappt hat.»

Die nun folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die Wechselwirkungen zwischen der Pflanzendecke und dem Klima der Vorzeit, mit anderen Worten auf die Verknüpfung von Vegetationsgeschichte und Paläoklimatologie.

Es seien hier einige Namen von Paläobotanikern bzw. Palynologen erwähnt, die Pionierarbeit geleistet haben, wie Konrad Gessner, Joh. Jak. Scheuchzer, O. Heer, H. Potonié, W. Gothan, C.A. Weber, G. Lagerheim, L. von Post, F. Firbas, K. Bertsch, F. Overbeck, W. Szafer, K. Faegri, J. Iversen, G. Erdtman, M. van Campo, Sir Harry Godwin, M. Nejshtadt, J. Troels-Smith, P. Keller, W. Lüdi, M. Welten.

Die Erforschung der Gletschergeschichte in Verbindung mit dem Wandel der Pflanzendecke, d.h. die Verknüpfung von quartärer Geomorphologie und Pollenanalyse, kann in der Schweiz schon auf eine längere Tradition zurückblicken.

Die ersten, bewusst auf diese Fragestellung durchgeführten Arbeiten stammen von H. Zoller aus Mitte der sechziger Jahre (H. Zoller, C. Schindler und H. Röthlisberger, 1966).

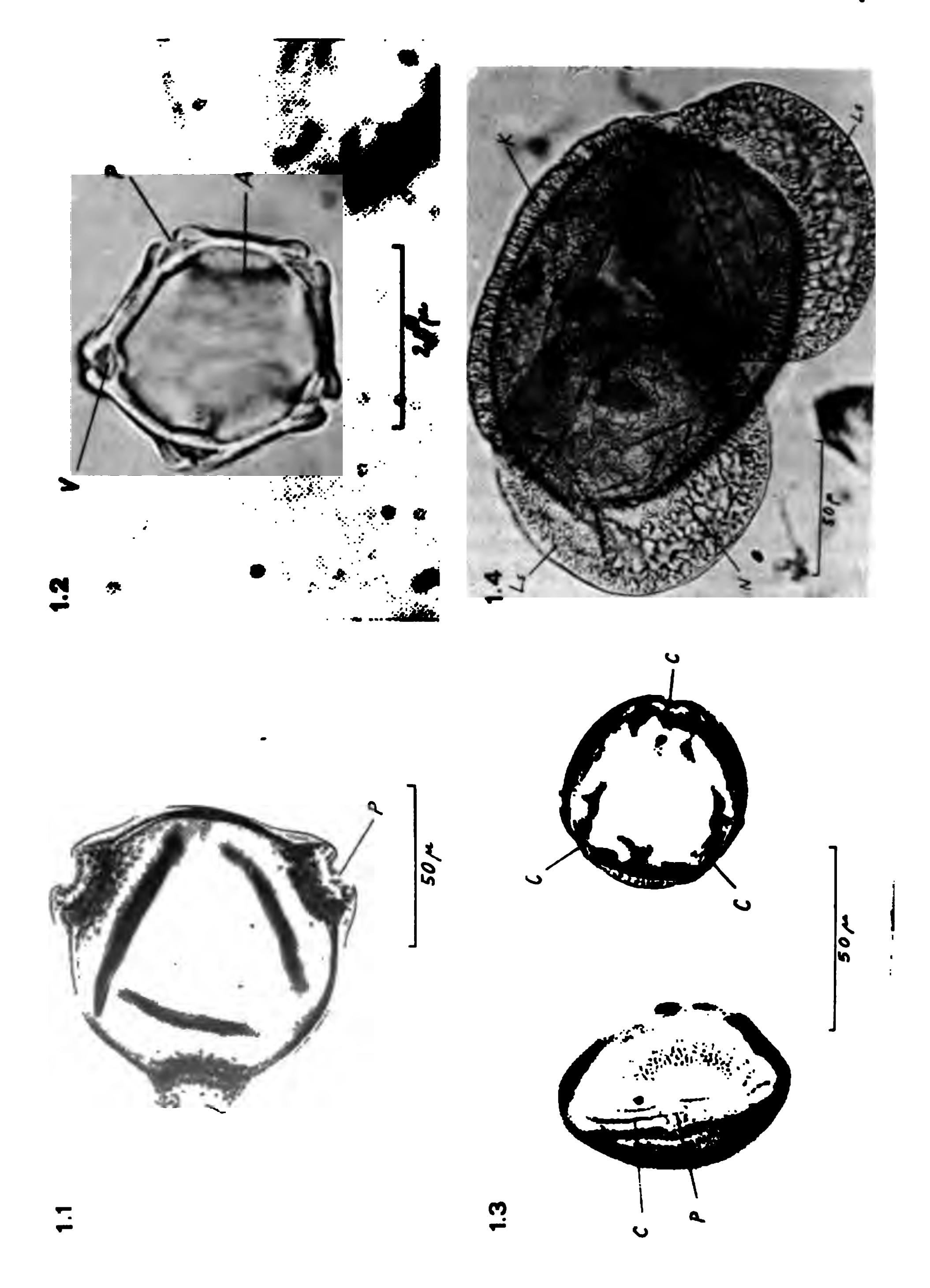
2 Methoden zur Erforschung des Paläoklimas

Im Gegensatz zum gegenwärtigen Klimatologen existieren für den Paläoklimatologen weder Thermometer noch Barometer. Wie schon eingangs erwähnt, haben für den Erforscher des Vorzeitklimas die geomorphologischen und paläontologischen Klimazeugen, wie Gletscherablagerungen, Verwitterung, Abtragsphänomene, Sedimente aller Art und Fossilien, grösste Bedeutung. Physikalische Untersuchungsmöglichkeiten, wie z.B. die Radiokarbon-

und Sauerstoffisotopen-Methode zur Ermittlung von absoluten Altern bzw. Temperaturveränderungen des Vorzeitklimas, sind theoretisch die exaktesten. Doch sind in ihrer Anwendung deutlich Grenzen gesetzt. Zur paläoklimatologischen Auswertung von Klimazeugen findet in meinen eigenen Untersuchungen vor allem die Pollenanalyse Anwendung, weshalb das Hauptgewicht der folgenden Ausführungen auf dieser Methode liegt.

Stellvertretend für alle Sporomorphen zeigen die Bilder 1.1 bis 1.4 vier verschiedene Pollentypen, nämlich 1. einen triporaten Pollen des Weidenröschens *(Epilobium angustifolium)*, 2. einen stephanoporaten Pollen der Schwarzerle *(Alnus glutinosa)*, 3. einen tricolporaten Pollen des Sonnenröschens *(Helianthemum nummularium)* und 4. einen vesiculaten, d.h. mit Luftsäcken versehenen Pollen der Weisstanne *(Abies alba)*. Die in Seen und Mooren zur Sedimentation gelangten Pollen und Sporen stammen von mehreren Quellen aus verschiedenen Entfernungen (Bild 2). Mit zunehmender Distanz vom Emittenten nimmt die Anzahl der zur Ablagerung gelangenden Sporomorphen mehr oder weniger exponentiell ab. Man kann damit einen Lokal- bzw. Umgebungsflug bis zu 500 m, einen Nahflug bis 10 km, einen Weitflug bis 100 km und einen Fernflug von über 100 km Entfernung von der Quelle unterscheiden. Bereiche, die über den Nahflug hinausreichen, sind durch wesentlich weniger Pollentypen charakterisiert. Lokal- und Nahflug erlaüben die Rekonstruktion von Biocoenosen auf der Integrationsstufe eines Vegetationsmosaiks und können Hinweise zur Verbreitungsbiologie bzw. Synökologie liefern. Weit- und Fernflug können Aufschluss über die Flora eines grösseren Gebiets und über den Wandel der Vegetationsgürtel geben (Bild 2).

Als weitere wichtige Methoden zur Erforschung des Paläoklimas seien ausserdem die Jahrringanalyse bzw. Dendrochronologie, ferner die Sauerstoffisotopenanalyse in festländischen Sedimenten, Tiefseeablagerungen und in arktischen Eiskernen kurz erwähnt. Diese liefern Angaben über die ehemalige mittlere atmosphärische Temperatur und über den mittleren Niederschlag. Die Analyse eingeschlossener Luftblasen erlaubt, die damalige Zusammensetzung der Erdatmosphäre zu ermitteln. Wegweisend hierzu sind die Untersuchungen von H. Oeschger und W. Dansgaard in Eiskernen von Grönland (z.B. H. Oeschger, 1980; W. Dansgaard, 1980). Die Untersuchungen von CLIMAP ergaben globale Karten zur ehemaligen Temperatur der Meeresoberfläche, zur mittleren Spiegelhöhe, zur Paläogeographie, zur Form der damaligen polaren Eiskappen und zur Ausdehnung des Packeises. Indirekt durch Lössablagerungen, Dünen und Schwermineralien erschliessbar ist die ehemalige atmosphärische Zirkulation. Die Chronologie der vorherrschenden Windrichtungen kann Auskunft geben über die Häufigkeit von meridionaler bzw. zonaler Zirkulation. Weitere paläoklimatische Aussagen erlauben Untersuchungen zu ehemaligen Seespiegelschwankungen und zum damit verbundenen Wechsel von Feucht- und Trockenperioden. Die Analyse von planktonischen Foraminiferen sowie der Wandel ehemaliger Käferfaunen können ebenfalls paläoklimatisch ausgewertet werden.


1.1
P
50 μ
1.2
P
A
V
1.3
C
C
C
C
P
50 μ
1.4
K
50 μ

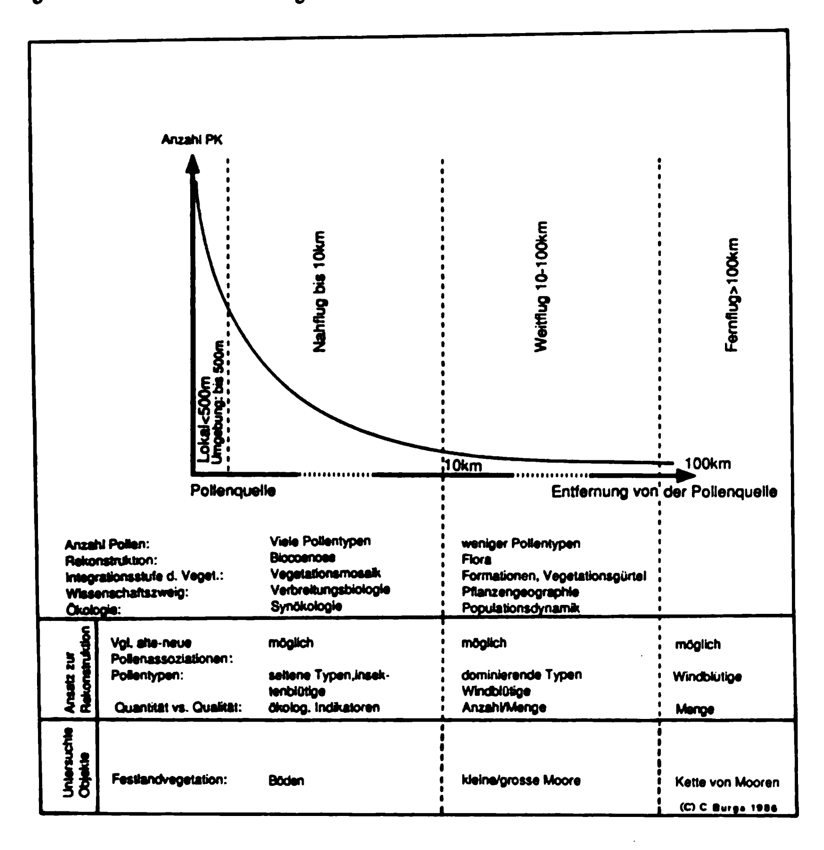


Bild 2 Pollenflug und paläoökologische Aussage.

Fig. 2 Pollen spreading and palaeoecological evidence.

◀ Bild 1 Beispiele quartärer Pollentypen.

Fig. 1 Examples of Quaternary pollen types.

1.1 Weidenröschen *(Epilobium angustifolium).* 1000 : 1
Öffnungstyp: Triporat. Aperture character: Triporate.
1.2 Schwarzerle *(Alnus glutinosa).* 2481 : 1
Öffnungstyp: Stephanoporat. Aperture character: Stephanoporate.
1.3 Sonnenröschen *(Helianthemum nummularium).* 1500 : 1
Öffnungstyp: Tricolporat. Aperture character: Tricolporate.
1.4 Weisstanne *(Abies alba).* 1071 : 1
Öffnungstyp: Inaperturat / vesiculat / monotrem. Aperture character: Inaperturate / vesiculate / monotreme.

Abkürzungen / Abbreviations: P = Porus, V = Vestibulum, A = Arcus, C = Colpus, Ls = Luftsack/Saccus, N = Netz/Reticulum, K = Kamm/Sexine thickening at the proximal pole.

3 Probleme zur Rekonstruktion der Paläovegetation bzw. des Paläoklimas mit Hilfe der Pollenanalyse

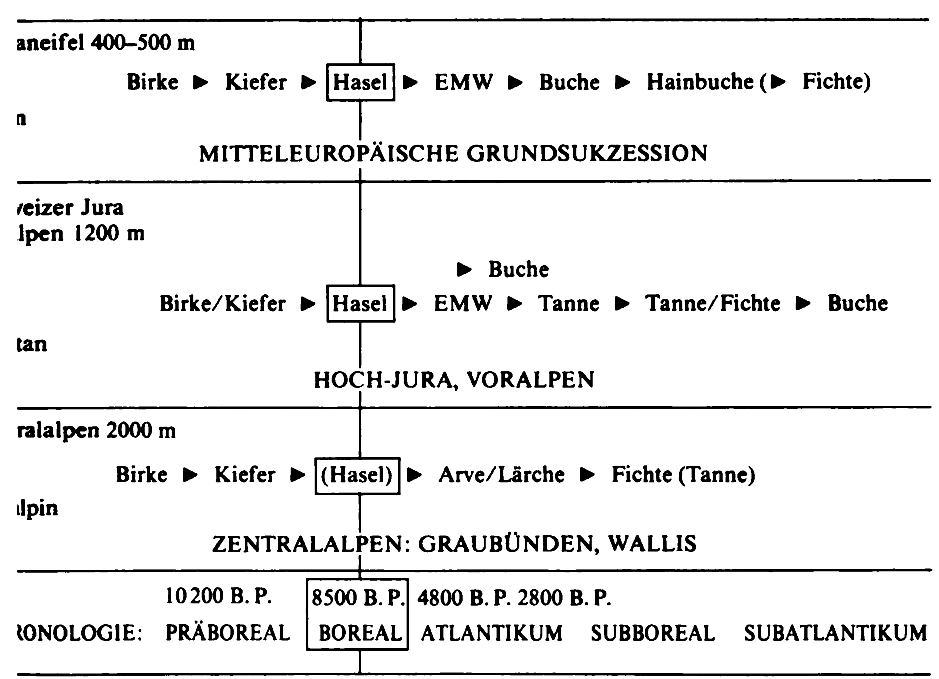
Betrachten wir nun einige Probleme zur Rekonstruktion der Paläovegetation bzw. des Paläoklimas mit Hilfe der Pollenanalyse. Die Veränderungen der Vegetation sind nicht nur klimatisch bedingt, sondern können natürliche Sukzessionen bzw. eine Besiedlung von neu entstandenen Rohböden darstellen. Ferner gibt die Pollenanalyse kaum Auskunft über die Schwankung eines einzelnen Klimafaktors, sondern eher über den Wechsel des gesamten Klimas. Im Verlauf einer natürlichen Sukzession wandelt sich der Prozentanteil der verschiedenen geographischen Florenelemente, so dass dadurch eine beträchtliche Veränderung des Mikroklimas mit einhergehen kann. Bei der paläoklimatischen Deutung von Pollendiagrammen kann dies zu Fehlschlüssen führen, indem fälschlicherweise auf eine Veränderung des Grossklimas geschlossen wird. Weitere Fehlerquellen bieten Bodenreifungsvorgänge, die eine sekundäre Sukzession der Vegetation bewirken, oder der einwanderungsgeschichtlich bedingte Vegetationswandel, insbesondere für die Zeit von 8000–2000 Jahre v.h. Als weiteres prinzipielles Problem der Pollenanalyse kommt in Gebirgsregionen der Aspekt der Höhenstufenentwicklung der Vegetation hinzu.

Ein biostratigraphisch ermittelter Vegetationswandel im Holozän muss je nach der jeweiligen Höhenstufe des Untersuchungsobjektes im Vergleich zu einer andern Höhenlage etwas verschieden ausfallen. Hier zeichnen sich also klimatische, einwanderungsgeschichtliche und konkurrenzbedingte Auswirkungen auf die Vegetation ab. Die Tabelle 1 stellt den allgemeinen Vegetationswandel von der collinen bis subalpinen Stufe seit der Nacheiszeit dar. Dabei ist klar ersichtlich, dass es beispielsweise in den Zentralalpen Graubündens oder des Wallis zu einer Lärchen-/Arvenwald- statt zu einer Eichenmischwald- bzw. Buchen-/Tannenwald-Entwicklung kam. Umgekehrt gelangte zur Zeit des Boreals die Hasel dank der grossen ökologischen Amplitude zu einer bis in die subalpine Stufe reichenden Ausbreitung. Damit kann in der Schweiz das sogenannte erste Haselmaximum oft als biostratigraphische Zeitmarke des Boreals verwendet werden.

Mit dem Aspekt der Höhenstufung steht damit die Bildung der Waldgürtel und ihre Reaktion auf Klimaveränderungen in direktem Zusammenhang. Vorliegendes Bild 3 stellt zwei Fälle von Waldgürtelveränderungen zu den Zeitpunkten t_1 bis t_4 dar. Rechts daneben befinden sich die Pollenprozentkurven für die beiden waldbildenden Taxa A und B. Der Fall 1 zeigt, wie die Baumart B im Lauf des Zeitintervalls t_1–t_2 über dem Waldgürtel A einen eigenen Gürtel bilden konnte. Die beiden Pollenprozentkurven verlaufen somit mehr oder weniger gegenläufig. Der Wandel zur Vorherrschaft eines Waldbaumes darf somit nicht generell durch ein bestimmtes klimatisches Ereignis erklärt werden. Im Fall 2 ist eine klimatisch bedingte Waldgrenz-Depression, d.h. die Schwankung des B-Gürtels, vom Standpunkt drei verschieden hoch gelegener Untersuchungsobjekte für die Zeitpunkte t_3–t_4 dargestellt. Das Objekt 2 der

lle 1 Höhenstufung der Vegetation und mitteleuropäische Grundsukzession.

e 1 Vertical vegetation zonation and central European plant immigration.



aneifel 400–500 m

n

Birke ► Kiefer ► Hasel ► EMW ► Buche ► Hainbuche (► Fichte)

MITTELEUROPÄISCHE GRUNDSUKZESSION

reizer Jura

lpen 1200 m

tan

► Buche

Birke/Kiefer ► Hasel ► EMW ► Tanne ► Tanne/Fichte ► Buche

HOCH-JURA, VORALPEN

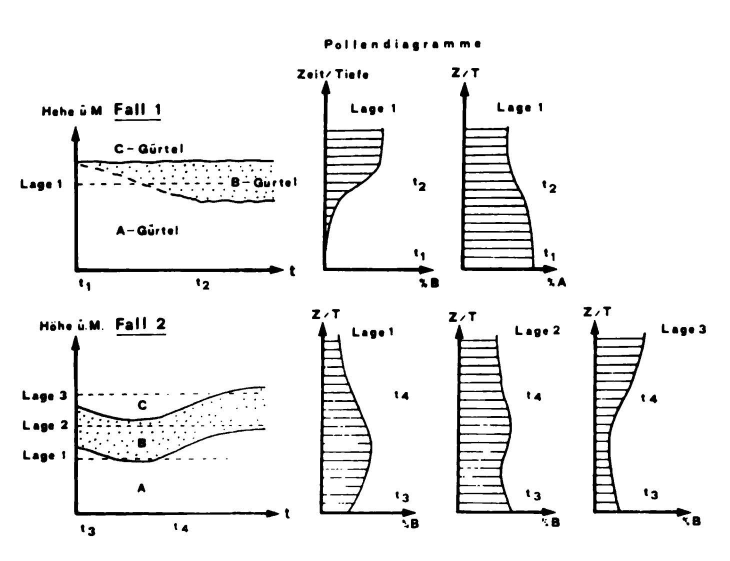
ralalpen 2000 m

ılpin

Birke ► Kiefer ► (Hasel) ► Arve/Lärche ► Fichte (Tanne)

ZENTRALALPEN: GRAUBÜNDEN, WALLIS

	10200 B.P.	8500 B.P.	4800 B.P.	2800 B.P.	
ONOLOGIE:	PRÄBOREAL	BOREAL	ATLANTIKUM	SUBBOREAL	SUBATLANTIKUM



3 **Waldgürtelbildung** und Klimaschwankungen.

3 **Forest belt** development and climate fluctuations.

Lage 2 bleibt stets im Schwankungsbereich von B und zeigt somit geringe Schwankungen in den Pollenprozentwerten von B. Es ist also zum Nachweis von Klimaschwankungen nicht geeignet. Die Objekte der Lagen 1 und 3 befinden sich im Grenzgebiet von B, d.h. sie reagieren empfindlich auf Waldgrenz- bzw. Klimaschwankungen. Die Pollenprozentkurven verhalten sich hier reziprok zueinander. Zusammenfassend heisst das nun, dass der Nachweis von Klimaveränderungen aufgrund von Moor- bzw. Seeprofilen aus verschiedenen Höhenlagen erbracht werden muss. Da dies nicht für jeden Landschaftstyp möglich ist, wird eine botanisch-biostratigraphische Eiszeitgliederung je nach Gebiet ganz unterschiedlich gut realisierbar sein.

In letzter Zeit hat vor allem B. Frenzel (1980) versucht, anhand der pollenanalytisch untersuchten Profile und der dadurch rekonstruierten Vegetationsgeschichte Rückschlüsse auf Paläotemperaturen und -niederschläge zu erlangen. Dieses auf das Prinzip des Aktualismus beruhende Verfahren, wonach ein vegetationsgeschichtlich rekonstruierter Vegetationstyp mit der aktuellen bzw. potentiellen Vegetation derselben Region verglichen wird, kann also angenähert die Veränderungen von Temperatur und Jahresniederschlag gegenüber heute liefern. Voraussetzung hierzu ist aber die Kenntnis der entscheidenden klimatischen Faktoren für die heutige Verbreitung der betreffenden Taxa. So berechnete B. Frenzel (1980) beispielsweise für das Würm-Hochglazial die Veränderungen der Jahresmitteltemperatur gegenüber heute um rund 7 bzw. 13° C für Süd- bzw. das nördliche Mitteleuropa. Die entsprechenden Veränderungen des Jahresniederschlags schwanken zwischen 234 und 493 mm. Der Autor hat aber schon 1967 auf die beschränkte Anwendbarkeit dieser Methode hingewiesen. Denn schliesslich bedingen unterschiedliche Klimafaktoren ein Pflanzenareal. Nebst den physiologischen Fähigkeiten einer Pflanze spielt u.a. auch die Konkurrenz für ihre Verbreitung eine entscheidende Rolle.

4 Spät- und postglaziale Klimaschwankungen in den Schweizer Alpen

Ein guter Klimaindikator ist die Lage der vom Menschen nicht beeinflussten Waldgrenze. Die potentielle Waldgrenze der Alpen bildete sich im Lauf der späteiszeitlichen Wiederbewaldung im Alleröd-Interstadial heraus. Von der damaligen Höhe um 1500 m ü.M. stieg sie, abgesehen vom Kälterückschlag in der Jüngeren Dryas, im beginnenden Holozän bis gegen 2100 m. Das Bild 4 zeigt den nacheiszeitlichen Waldgrenz-Verlauf für das Gebiet der West-, Zentral-, Süd-, Nord- und Ostalpen sowie des Juras. Während des postglazialen Wärmeoptimums im Atlantikum befand sich die Waldgrenze um 100–200 m höher als die heutige potentielle Lage. Die nacheiszeitlichen Klimaverschlechterungen kommen jeweils in einer deutlichen Waldgrenz-Depression zum Ausdruck: So beispielsweise die boreale Oberhalbstein-/Schamser-/Venediger-Schwankung und die Piora-Schwankungen im Jüngeren Atlantikum. Für

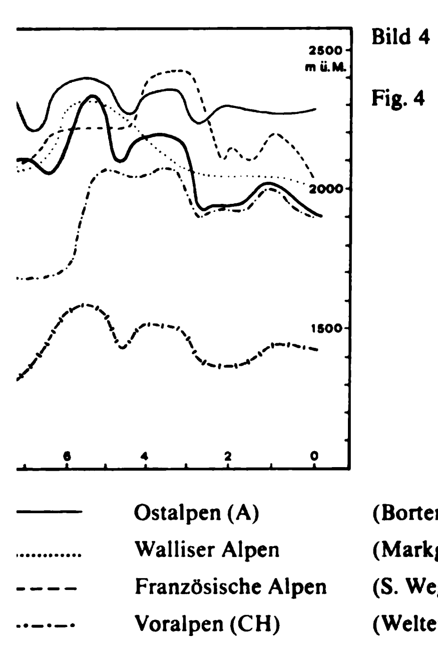


Bild 4 Waldgrenzschwankungen in den Alpen (Schweiz, Frankreich, Österreich).

Fig. 4 Timber-line fluctuations in the Alps (Switzerland, France, Austria).

———	Ostalpen (A)	(Bortenschlager 1970, Patzelt 1973)
....	Walliser Alpen	(Markgraf 1969, Welten 1982)
----	Französische Alpen	(S. Wegmüller 1977)
..–.–.	Voralpen (CH)	(Welten 1952, 1982)
▬▬	Bündner Zentralalpen	(Burga 1985)
ı–ı–ı–	Jura	(S. Wegmüller 1966)

ach 3000 Jahren v.h. ist eine allgemeine Waldgrenz-Senkung festzu-
nerseits ist diese durch den subborealen Klimarückschlag, anderer-
auch durch die in der Bronzezeit einsetzende menschliche Vegeta-
ıflussung zu erklären. Von besonderer Bedeutung für das Ausmass
dgrenzsenkung und damit für eine Klimaverschlechterung ist deren
ɛ. In den Ostalpen Österreichs scheinen diese Schwankungs-Beträge
sten zu sein. Möglicherweise hängt dieses Phänomen mit der nach
ehmenden Kontinentalität zusammen. Unter den nacheiszeitlichen
rauheren Klimas ragt die boreale Oberhalbstein-/Schamser-/Vene-
vankung durch einen teilweise massiven Arven-Rückgang in den
ɪen hervor (Bild 5). Für die Zeit von 8500 bis 7200 Jahre v.h. liegen
weizerisch gesehen am meisten Anzeichen zu holozänen Klima-
ngen vor (C.A. Burga 1979). Dieser boreale Klimarückschlag wirkte
ıem grossen Höhenintervall auf die Vegetation aus und dürfte wohl
500–1000 Jahren einen Einfluss gehabt haben. Dieser erstmals 1975
Burga im Moorprofil «Lai da Vons» des Schams in Graubünden
te boreale Arvenrückgang wurde in der Folge als «Schamser-
ıng» bezeichnet.

Arven-Rückgang konnte nun in mehreren weiteren Moorprofilen
ıer und Walliser Alpen bestätigt werden, so dass dieses vegetations-

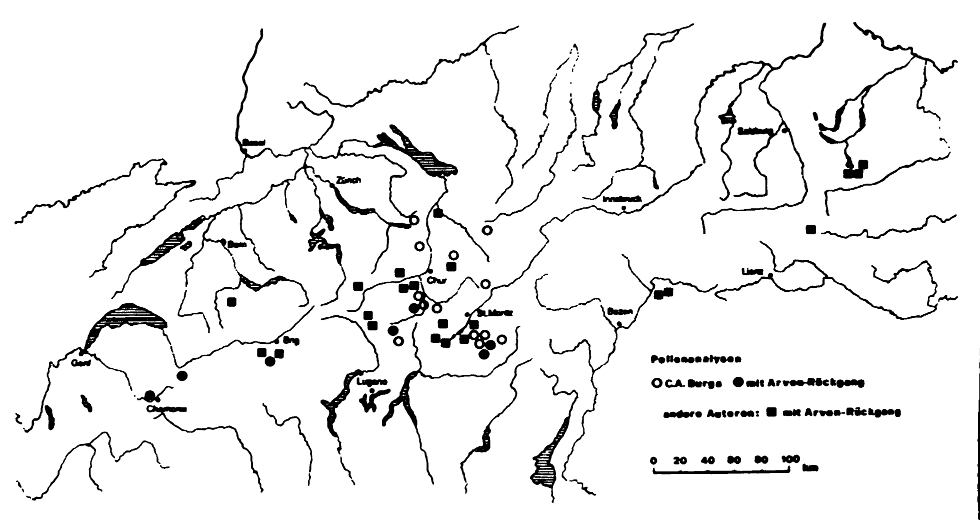


Bild 5 Daten zum Arven-Rückgang im Boreal.

Fig. 5 Evidence to the *Pinus cembra* recession during the Boreal.

geschichtlich-paläoklimatische Phänomen überregionale Bedeutung aufweist. In den betreffenden Pollendiagrammen gehen die Arvenprozente um durchschnittlich 12%, in einigen Fällen sogar bis 50% zurück. Da bekanntlich die Arve ein typisch zentralalpines Nadelholz ist, muss sich ein derartiger paläoklimatischer Nachweis auf die Zentralalpen beschränken.

Die Schamser-Schwankung findet u.a. in folgenden Moorprofilen ihre Bestätigung: Im Oberhalbstein das Profil Sur; im Vorderrheintal und am Lukmanier die Profile Affeier, Brigels, Segnes, Campra und Acquacalda; im Prättigau das Profil Faninpass; im Oberengadin mehrere Profile bei St. Moritz und am Malojapass; im Puschlav die Profile Aurafreida und Selva; im Wallis die Profile Böhnigsee, Saas Fee und Lac de Champex; auf dem Simplon ein Profil im Bereich der Passhöhe; im Berner Oberland das Profil Obergurbs; in der Vallée de Chamonix das Profil La Flatière und schliesslich Profile aus dem Salzkammergut, den Hohen Tauern und dem Südtirol. Dieser Arvenrückgang kann aber in einigen Fällen auch sukzessionsbedingt vorliegen. Die sichersten paläoklimatischen Hinweise liefern jene Pollendiagramme, wo die Arvenkurve nach der borealen Depression deutlich wieder ansteigt und kein Dominanzwechsel mit anderen Baumarten stattfindet. Der boreale Klimarückschlag machte sich natürlich auch in andern Regionen mit ganz verschiedener Vegetation bemerkbar. So konnte beispielsweise H.J. Beug (1967) für 7600 v. h. in Dalmatien einen Klimawechsel zu trockenen Sommern feststellen, wobei die Eichenwälder zugunsten von Wacholder und Steinlinde zurückgingen. In Nordafrika, Mauretanien und Äthiopien ereigneten sich um 7500 v. h. kurze Trockenperioden (A. Faniran und L.K. Jeje, 1983). Gleichzeitig erfolgte ein Gletscher-Ausbruch in der Hudson Bay mit einer Hebung des

Meeresspiegels um 7–10 m in Europa. Diese borealen Trockenperioden könnten für den zentralalpinen Arvenrückgang die Erklärung liefern, wonach die Arve vor allem unter der Frosttrocknis zu leiden hatte.

5 Zusammenfassung und Schlussbemerkungen

Das Bild 6 zur Entwicklung des zentralalpinen Waldgürtels der Schweiz seit der Späteiszeit und der ungefähre Verlauf der klimatischen Schneegrenze sollen das Zusammenspiel von Klima und Vegetation in Abhängigkeit von Zeit und Höhenlage zusammenfassend verdeutlichen.

Dieses Diagramm mit der Zeitachse als Abszisse und den Höhenmetern als Ordinate stellt die Entstehung und Veränderung vom Wald- und Steppengürtel, vom alpinen Gürtel und die Wandlung zu Kulturland dar. Ferner sind aus dieser Darstellung der generelle Anstieg von Wald- und Schneegrenze an der Wende von der Spät- zur Nacheiszeit und die darauffolgenden klimatisch und anthropogen bedingten Schwankungen sowie die Einwanderung und Ausbreitung der wichtigsten waldbildenden Holzarten ersichtlich.

Die nach dem letzten *Würm*-Maximum um 18 000 oder 20 000 Jahre v.h. einsetzende Klimaverbesserung kommt in den gemässigten Breiten der Nord-Halbkugel durch ein rasches, bisweilen sogar plötzliches Abschmelzen der

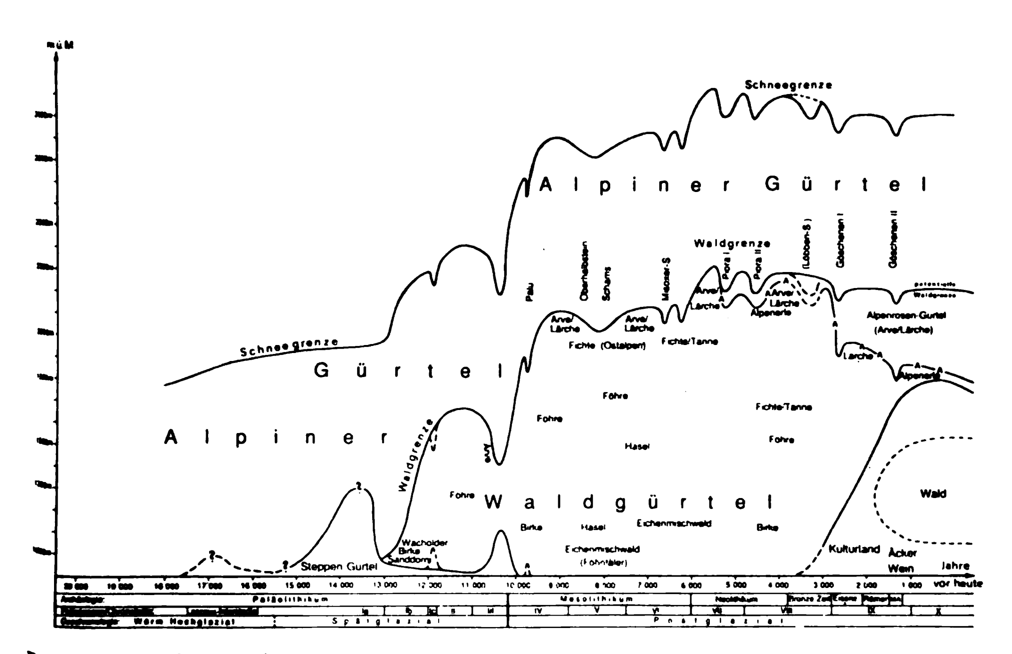


Bild 6 Entwicklung des zentralalpinen Waldgürtels der Schweiz seit der Späteiszeit.

Fig. 6 Development of the Central Alpine forest belt of Switzerland since the Late-Würmian.

Gletscher um 15 000 v. h. zum Ausdruck. Innerhalb von etwa 2000 Jahren stieg die Oberflächentemperatur des Atlantiks um etwa 14° C (Golf von Biskaya). In dieser Zeit konnte sich ein Steppengürtel, bestehend aus Wermut, Gänsefussgewächsen, Nelkengewächsen, Gräsern und Meerträubel, auf dem eisfrei gewordenen Areal herausbilden. Während dieser Periode des Eiszerfalls änderte sich ein Weltall-Element, nämlich das Perihel. Vor 12 000–8000 Jahren fiel es mit dem Sommer auf der Nordhalbkugel zusammen und begünstigte so die Sommertemperaturen. Die extraterrestrische Sonnenstrahlung war damals um 7% höher (H. Flohn und R. Fantechi, 1983).

Im *Bölling*-Interstadial wurden viele Standorte durch die aufkommenden Sträucher, wie Wacholder, Sanddorn, Zwergweiden und die Birke besetzt. Dies ist die Reaktion auf die um 13 000 v. h. einsetzende starke globale Erwärmung. Die Wald- und Schneegrenze bewegte sich rasch in Höhen um 1500 bzw. 2300 m ü. M. Die diesbezügliche Kulmination wurde im *Alleröd*-Interstadial um 11 700 v. h. erreicht, wobei die späteiszeitliche Wiederbewaldung durch Föhre und Birke bis auf über 1600 m erfolgte. Aufgrund von Käferfaunen schloss G. R. Coope (1975) auf eine Erhöhung der Sommertemperatur um 10–12° C in weniger als 100 Jahren!

Der markante Klimarückschlag der *Jüngeren Dryas*, welcher sogar in Südfrankreich und Florida Vegetationsveränderungen bewirkte, zeichnet sich im ganzen Alpenraum durch eine Waldgrenzsenkung von 200–300 m ab. Der vorher stark eingeengte Steppengürtel erfuhr nochmals eine Reaktivierung, bevor er in der Nacheiszeit auf Spezialstandorte verdrängt wurde. Polares Wasser drang noch bis zum Golf von Biskaya vor, und das Schottische Hochland wurde erneut vergletschert (J. J. Lowe und M. J.C. Walker, 1984). Die Wende zur Nacheiszeit ist gekennzeichnet durch einen steilen Anstieg der Wald- und Schneegrenze auf 2100 bzw. 2900 m ü. M. Die im Alleröd eingewanderte Arve bildete nun im *Präboreal* zusammen mit der Lärche die Waldgrenze. Dieser Lärchen-Arven-Gürtel erfuhr im Lauf des *Boreals* eine klare Einengung als Folge des damaligen Klimarückschlags. Zu Beginn des *Älteren Atlantikums* erreichte die von E nach W wandernde Fichte die Bündner Zentralalpen. Wenig später sind eine maximal hohe Waldgrenze in durchschnittlich 2300 m und eine klimatische Schneegrenze bis über 3100 m als Ausdruck des nacheiszeitlichen Klimaoptimums festzustellen.

Im *Jüngeren Atlantikum* und am Übergang zum Subboreal sind wieder klare Anzeichen zu Klimaverschlechterungen vorhanden, die um 5000–4500 v. h. weltweit zu beträchtlichem Gletscherwachstum führten.

Seit dem ausgehenden Neolithikum ist an vielen Stellen der Zentralalpen die erste menschliche Rodungstätigkeit festzustellen. Diese zunächst mehr
uellen Waldgrenz-Senkungen verstärkten sich seit der Eisen- und Rö-
it und besonders seit dem Frühmittelalter zu Waldgrenz-Depressionen
ınd 300 m. Die Klimarückschläge der Eisenzeit und des Frühmittelalters
diese Waldgrenzsenkungen einen zusätzlichen verstärkenden Effekt
ldgürtel wurde nun von unten und von oben her eingeengt. Die

:n Regionen lieferten nach der Rodung wertvolles Kulturland, während pwirtschaftlich genutzte Waldgrenz-Zone zu einer starken Einengung irchen-Arven-Gürtels, stellenweise sogar zur völligen Zerstörung dessel-ührte. An dessen Stelle entwickelten sich meistens ausgedehnte Alpen-·Zwergsträucher-Bestände.

ıgen wir zum Schluss noch kurz nach der *praktischen Bedeutung* der Er-ıung von Vegetations- und Klimageschichte, so treten zwei Haupt-te hervor, nämlich die Entwicklung unseres Klimas in der Zukunft und ımit zusammenhängende CO_2- und Ozon-Problem und andererseits der ›pogen bedingte Landschaftswandel.

:r seien nur kurz zum zweiten Punkt einige Bemerkungen hinzugefügt. ›ollenanalytische Untersuchung geeigneter Sedimente liefert Grundla-nntnisse für Natur- und Landschaftsschutzgebiete. Sie kann anthropo-Veränderungen des Naturhaushaltes aufdecken. Ferner gestattet sie die he Einstufung bzw. Abfolge wichtiger landschaftsverändernder Vorgän-ie Uferzerstörungen, Änderungen des Wasserhaushaltes und Verände-n der Standortfaktoren, zu ermitteln.

: Erforschung des Paläoklimas mit Hilfe der Vegetationsgeschichte noch viele ungelöste Probleme auf, die hier nur kurz angedeutet seien. nnen gewisse Klimaschwankungen heute noch zuwenig genau zeitlich renzt werden. Es geht also um die exaktere chronologische Einstufung ›atenmaterials in eine universelle Zeitskala, die bis etwa 125 000 Jahre urückreichen sollte.

ner gilt es, das Ausmass einer Phase schlechteren Klimas zu ermitteln. sslich muss man bestrebt sein, die Vegetationsgeschichte und Paläokli-ogie über grössere Gebiete zu rekonstruieren.

:ratur

-I.J. (1967): On the forest history of the Dalmatian coast. Review of Palaeobotany and rnology *2*, 271–279.

, G. L. L. Graf von (1778): Epoques de la Nature. In: Supplément à l'Histoire naturelle (par fon). A Paris, de l'Imprimerie royale, 1774–1789. 7 Bände.

C.A. (1975): Spätglaziale Gletscherstände im Schams. Eine glazialmorphologisch-pollen-lytische Untersuchung am Lai da Vons (GR). Diplomarbeit Univ. Zürich, 72 Seiten, un-l.

C. A. (1979): Postglaziale Klimaschwankungen in Pollendiagrammen der Schweiz. Vjschr. f. Ges. in Zürich *124* (3): 265–283.

C.A. (1988): Swiss vegetation history during the last 18 000 years. New Phytologist, *110*, -602.

G. R. (1975): Climatic fluctuations in northwest Europe since the Last Interglacial, indi-:d by fossil assemblages of Coleoptera. Geological Journal (special issue), *6*. 153–168.

ıard, W. (1980): Palaeo-Climatic Studies on Ice Cores. In: Oeschger, H., Messerli, B. und ar, M. Das Klima, 237–245. Springer, Berlin, 296 Seiten.

ı, A. und Jeje, L.K. (1983): Humid Tropical Geomorphology. Longman London, 414 Sei-

Flohn, H. und Fantechi, R. (1984): The Climate of Europe: Past, Present and Future. Dordrecht, 356 Seiten.

Frenzel, B. (1967): Die Klimaschwankungen des Eiszeitalters. Vieweg Braunschweig, 291 Seiten.

Frenzel, B. (1980): Klima der letzten Eiszeit und der Nacheiszeit in Europa. Veröffentlichungen der Joachim Jungius-Gesellschaft der Wissenschaft in Hamburg, *44*, 9–46.

Lichtenberg, G.C. (1902–1908): Aphorismen. Herausgegeben von A. Leitzmann. Deutsche Literaturdenkmale Nr. 123, 131, 136, 140, 141, Berlin.

Lowe, J.J. und Walker M.J.C. (1984): Reconstructing Quaternary Environments. Longman Essex, 389 Seiten.

Oeschger, H. (1980): In der Natur gespeicherte Geschichte von Umweltsvorgängen. In: Oeschger, H., Messerli, B. und Svilar, M. Das Klima, 209–236. Springer, Berlin, 296 Seiten.

Zoller, H., Schindler, C. und Röthlisberger, H. (1966): Postglaziale Gletscherstände und Klimaschwankungen im Gotthardmassiv und Vorderrheingebiet. Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel, 77, 97–164.

PD Dr. C.A. Burga, Geographisches Institut der Universität Zürich-Irchel, *Winterthurerstrasse 190, 8057* Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135*/1: 31–46

Ökologische Strategien als Hilfe für das Verständnis von Umweltproblemen bei Tier und Mensch

Bernhard Nievergelt, Universität Zürich

Ökologische Strategien wie die r-K-Typen oder Pionier- und Klimaxarten sind einfache Modelle und stellen eine Verständnishilfe dar, wenn es darum geht, einzelne Tier- oder Pflanzenarten als in ihrer Umwelt angepasste komplexe Systeme zu begreifen oder Arbeitshypothesen zu formulieren. Als Beispiele werden drei Tierarten behandelt: Eisvogel, Reh und Steinbock, ausserdem – im Sinne eines etwas spekulativen Diskussionsbeitrages – unsere menschliche Gesellschaft, bei der ein unvollständiger Strategiewechsel beschrieben wird. Der Wert einfacher Modelle liegt nicht in der Deckungsgleichheit der Modellvorstellung mit dem verglichenen System. Einfache Modelle können mit der vernetzten und stets differenzierteren Wirklichkeit nicht übereinstimmen. Es wird zu zeigen versucht, dass neben den passenden Merkmalen gerade vom Modell abweichende Eigenheiten für das Verständnis einer Art besondere Beachtung verdienen.

Ecological Strategies as a Model to Understanding Problems of Animals and Man in a Particular Environment

With the well-known r-K-strategies we have a simple ecological model, that is helpful in efforts to understand complex systems such as a particular species of animals or plants in their specific environment. As examples the Kingfisher, the Roe deer and the Alpine ibex are treated. In addition - although in a more speculative manner – human society is considered for which a partial and therefore especially critical change in strategy is described.

In applying a simple ecological model to reality, which is always more complex, we can never expect a complete correspondence. However, it is shown that the value of a model becomes particularly evident in the analysis of those characters that do not coincide between reality and model.

1 Einleitung

Es gehört zu den ehrgeizigen Zielen eines Ökologen, differenzierte Prognosen über Verhalten und Funktion von Tierarten in ihren Lebensgemeinschaften formulieren zu können. Er möchte wissen und verlässlich voraussagen, wie sich einzelne Arten mit ihrer biotischen und abiotischen Umwelt auseinandersetzen und wie sich ein Artengefüge bei geänderten Standortbedingungen verschiebt. Quantitative Antworten sind bei diesen Fragen im Regelfall nur mit erheblichen Vorbehalten möglich. Ändern sich die Umweltverhältnisse gar drastisch, fehlt auch für nur qualitative Aussagen eine sichere Basis.

Prognosen setzen ein umfassendes Verständnis einer Art voraus. Gefragt sind damit Auskünfte aus verschiedenen Fachrichtungen: so zur Morphologie, Physiologie, Ökologie, Ethologie und Phylogenie. Sie führen insgesamt zu einem Merkmalskombinat, in dem sich die ins Auge gefasste Art als ganzheitliches System darstellt. Die Vielfalt der Elemente führt indessen zu einem methodischen Kernproblem: Wie lässt sich das verwirrende Netzwerk funktional verstehen? Gesucht ist damit eine Ordnungsvorstellung, welche das Merkmalskombinat einer Tier- oder auch Pflanzenart zu einem sinnvollen und le-

benstüchtigen System werden lässt. Welches ist das Modell, das als Brücke zur direkt nicht fassbaren Wirklichkeit das Grundmuster aus der Vielfalt der Daten herausschälen lässt?

Gemäss allgemeiner Auffassung wird unter einem Modell eine Abstraktion verstanden, eine auf wesentliche Strukturen reduzierte Ordnungsvorstellung der Wirklichkeit (vgl. z. B. E. P. Odum 1971). Formal kann es sich dabei um eine Graphik, eine Beschreibung oder um eine Gleichung handeln. Modelle sollen helfen, komplexe undurchsichtige Phänomene zu ordnen, Schlüsselprozesse zu erkennen, und sie gestatten Voraussagen. Sie stimmen naturgemäss aber nicht mit der im Einzelfall stets komplexeren Realität überein; sie sind nur vereinfachtes Abbild.

In diesem Beitrag wird zu zeigen versucht, was von einem einfachen Modell für das Verständnis von Arten erwartet werden kann samt ihren spezifischen Umweltproblemen, was es bedeutet, wenn sich Merkmale nicht modellgemäss verhalten, was uns ganz allgemein ein Modell nützt, auch wenn es nicht ganz passt. Gezeigt wird dies anhand der in ökologischen Lehrbüchern längst eingeführten r-K-Strategien. Dieses einfache Modell wird mit dem komplexen Merkmalskombinat der folgenden Tierarten konfrontiert: Eisvogel *(Alcedo atthis)*, Reh *(Capreolus capreolus)* und Alpensteinbock *(Capra ibex)*, ausserdem mit einem Entwicklungsprozess in unserer menschlichen Gesellschaft.

Der an diesen Beispielen durchgeführte Versuch, spezifische Anpassungsleistungen und Merkmale wie auch Umweltprobleme einzelner Arten funktional zu verstehen, stützt sich auf eine synthetisierende Betrachtungsweise. Logisches Vernetzen von Befunden und Hinweisen geniesst bei diesem Vorgehen gegenüber dem sorgfältigen Absichern einzelner Elemente Vorrang. Selbstverständlich muss gleichwohl der Verlässlichkeitsgrad der einbezogenen Daten und Resultate festgestellt werden. Aus dem Text geht hervor, welche Elemente des dargestellten oder beschriebenen Merkmalskombinates als gesichert, wahrscheinlich oder hypothetisch einzustufen sind.

2 Zum Modell der r- und K-Strategien

Mit r und K haben R. H. Mac Arthur und E. O. Wilson (1967) zwei je extreme ökologische Strategien oder Selektionstypen bezeichnet: r gilt dabei für auf Pionierverhältnisse, K für auf gesättigte Ökosysteme selektionierte Arten. Die Bezeichnungen r und K beziehen sich auf die logistische Gleichung für das Wachstum von Populationen bei begrenzter Umweltkapazität $dN/dt = rN (K-N)/K$. In dieser Gleichung bedeutet r die spezifische Zuwachsrate, K die Kapazität der Umwelt. Bei kleiner Populationsgrösse N wird die Wachstumskurve überwiegend durch r beschrieben. Bei einem N nahe der Kapazitätsgrenze dagegen wird der Zuwachs gering (vgl. dazu E. R. Pianka 1970, T. R. E. Southwood *et al.* 1974, H. S. Horn and D. I. Rubenstein 1984).

·-selektionierte Arten sind in ihrem ganzen Merkmalskombinat ausgerich-
auf eine hohe spezifische Zuwachsrate, auf Produktivität. Sie werden ge-
lert vor allem bei einer unberechenbaren und variablen Umwelt, bei der
Bestand auch drastisch reduziert werden kann, überall also, wo es gilt, den
ensraum immer wieder neu zu erobern. Für diesen Lebensraum sind frühe
festadien charakteristisch. Im Extremfall handelt es sich um eine ökologi-
e Vakuumsituation wie etwa nach einer Überschwemmung oder nach ei-
n Waldbrand. Die unter solchen Einflüssen unvermeidlich hohe Mortali-
rate auch unter den adulten Tieren begünstigt selektiv eine hohe Zuwachs-
:, gutes Ausbreitungsvermögen, rasches individuelles Wachstum, frühe Ge-
lechtsreife, geringe Körpergrösse, Flexibilität auch in den Umweltansprü-
n, Generalistentum.

)as Merkmalskombinat der K-selektionierten Arten dagegen ist gekenn-
:hnet durch Effizienz und Konkurrenzfähigkeit im gesättigten Lebens-
m. Dieser Typus wird gefördert durch konstante oder nur allmählich sich
.ernde, berechenbare Umweltverhältnisse, zum Beispiel also durch Kli-
tgesellschaften. Solche Verhältnisse mit einer kleinen Mortalitätsrate för-
n selektiv nicht eine hohe Zuwachsrate, dagegen intensive Brutpflege,
gsames individuelles Wachstum, späte Geschlechtsreife, grosse Körper-
sse, Spezialistentum.

)ie charakteristischen Merkmale, wie sie den beiden Typen zugeordnet
den können, zeigen je einen unübersehbaren inneren Zusammenhang. Es
.m Einzelfall aber oft nicht möglich, eine bestimmte Art eindeutig dem ei-
ı oder andern Typus zuzuordnen. Die Natur ist zu vielfältig, als dass sie
ı in zwei Klassen sortieren liesse. Es ist daher wohl richtiger, innerhalb ei-
r-K-Kontinuums von r- oder K-Tendenzen zu sprechen (vgl. E. R. Pianka
0 und R. J. Putman and S. D. Wratten 1984). Es gibt ausserdem zahlreiche
ıderfälle, bei denen wir r- und K-Qualitäten gemischt vorfinden: bei Para-
n etwa, die als zumeist hochgradige Spezialisten K-Tendenzen zeigen, da-
ıen aber mit einer extrem hohen Reproduktionsleistung auch r-Qualitäten.
nnoch hat sich dieses einfache Modell der r-K-Typisierung als ausseror-
ıtlich wertvoll erwiesen. Für die beiden Typen oder Tendenzen werden in
Literatur zum Teil auch andere Begriffe bzw. Begriffspaare verwendet.
· r etwa: Anfangssiedler, Pionierarten, Opportunisten, für K: Dauerbewoh-
, Klimaxarten, Persistente.

Auf extensivem Niveau scheint es möglich, ganze Organismengruppen
n einen oder andern Typus zuzuordnen. So gehören die Landwirbeltiere
gesamt zu den K-Strategen, wenn man sie etwa an Insekten oder bodenle-
ıden Wirbellosen misst, die in diesem Gesamtvergleich mit wenig Ausnah-
n zu den r-Strategen gehören (E. R. Pianka 1970). T. R. E. Southwood et al.
'4) weisen denn auch darauf hin, dass die Hauptradiation der Wirbeltiere
ırend verhältnismässig milden und stabilen erdgeschichtlichen Perioden
tgefunden hat (Jura, niedere Kreide, Eozän, Oligozän), während jene der
ekten vermutlich in klimatisch variablere Perioden fiel (Perm und Trias).

Bei diesem auf die je charakteristischen K- und r-Merkmale ausgerichteten, extensiven Gesamtvergleich zwischen Landwirbeltieren und Insekten zeigen sich wichtige Unterschiede im Grundmuster der generellen Lebensstrategie dieser beiden sehr verschiedenen Gruppen der Fauna. Das r-K-Modell lässt sich nun aber auch verwenden, um auf feinerem Niveau unterschiedliche Tendenzen innerhalb ausgewählter Klassen, Ordnungen oder Familien darzustellen, ja sogar im Vergleich zwischen Populationen der gleichen Art oder Lebensabschnitten desselben Individuums. So wäre das Reh als grosses Landwirbeltier zwar ein K-Stratege, innerhalb der Huftiere zeigt es indessen – wie weiter unten dargelegt wird – klare r-Tendenzen. Als Modell oder Denkhilfe für das Verständnis des Merkmalskombinates einer ausgewählten Art wäre ein Vergleich zwischen derart unterschiedlichen Gruppen, wie Wirbeltiere und Insekten es sind, zu grob und damit unbrauchbar. In diesem Beitrag werden die r-K-Zuordnungen ausschliesslich in Relation zu nah verwandten Arten oder zu Populationen der gleichen Art, aber in anderer Umweltsituation vorgenommen: der Eisvogel an anderen Vögeln etwa seiner Grösse gemessen, das Reh im Rahmen unserer einheimischen Wiederkäuer, der Steinbock – wie auch unsere menschliche Gesellschaft – in einem Vergleich verschiedener Umweltsituationen, die verbunden sind mit einem postulierten Positionswechsel auf der r-K-Achse.

Auf diesem subtileren Differenzierungsniveau liegt es auch nahe zu fragen, in welchen Situationen des natürlichen Vorkommens einer Art die eher r-typischen oder aber K-typischen Qualitäten im Vordergrund stehen. So dürften bei einer alpinen Pflanze beispielsweise im Bereich der oberen, vorwiegend durch abiotische Faktoren gesetzten Höhengrenze eher r-Qualitäten, im Bereich der unteren, vor allem konkurrenzbedingten Vorkommensgrenze aber die relativen K-Qualitäten wichtig sein.

Auch wenn man bedenkt, dass auf Grund der Einfachheit des Modelles beim Vergleich mit einzelnen Arten Kongruenz in allen Merkmalen ohnehin nicht erwartet werden darf, erscheint bei Pflanzen die von J.P. Grime (1979) beschriebene Einteilung in drei statt nur zwei Grundtypen als sehr zweckmässig. Grime unterscheidet zwischen C-, S- und R-Selektion. C – «competitive» – entspricht dabei in hohem Masse der K-Strategie, R – «ruderal» – der r-Strategie, S – «stresstolerant» – ist dagegen die spezifische Anpassung an extreme, zum Beispiel alpine Standortbedingungen. Im Sinne dieser Einteilung, die auch Kombinationen vorsieht, dürften im Bereich der oberen Höhengrenze einer Pflanze überwiegend die S-, nicht aber die R-Qualitäten massgebend sein (vgl. dazu auch E.D. Schulze 1982). Nach E.-G. Mahn (1986) sind beide Selektionskonzepte (r-K und C-S-R) für die Ableitung oder Interpretation populationsökologischer Entwicklungsstrategien nützlich. Einen dritten Strategietypus für die Anpassung an extreme Habitate hat schon 1975 auch R.H. Whittaker vorgeschlagen. R.H. Whittaker unterscheidet a) saturation- or interaction-selection (K), b) exploitation-selection (r) und c) adversity-selection. Da der ganze Beitrag zooökologisch orientiert ist und r und K auch nicht

Reproduktionspotential, Mortalitätsrate und Ausbreitungsleistung sind hoch, Bestand und Verbreitung variabel; in strengen Wintern können 80 bis 90 Prozent der Vögel sterben. Morphologisch fällt der verglichen mit dem kleinen Körper und kurzen Schwanz ungewöhnlich lange Schnabel auf. Mit diesem Schnabel im Zusammenhang stehen Nahrung und Nahrungserwerb, Elemente des Eisvogels, die sich wohl nur begrenzt mit der Modellvorstellung r-Strategie decken. Das mittels Stosstauchen erfolgreiche Fangen von Fischen ist viel eher das Merkmal eines Spezialisten, damit ein K-Element, das einen kräftigen Schnabel mit einer verhältnismässig grossen Mindestgrösse bedingen dürfte. Die übrigen Merkmale scheinen dagegen selektiv einen möglichst kleinen Körper zu fördern.

Falls eine solche Interpretation des Merkmalskombinates richtig ist, weist die verglichen mit einem Durchschnittsvogel aussergewöhnliche Proportion zwischen Körper und Schnabel, weisen damit jene Merkmale, welche gegen die Modellvorstellung verstossen, auf besondere Anforderungen an diese Tierart hin. Im Bestreben, die Art ganzheitlich zu verstehen, liefert uns das Feststellen der Abweichung vom Modell damit einen wichtigen Hinweis.

Der Eisvogel ist aufgeführt auf der Roten Liste der gefährdeten und seltenen Vogelarten (B. Bruderer und W. Thönen 1977). Aus der Erfahrung heraus, dass in erster Linie Spezialisten, an bestimmte Verhältnisse gebundene, wenig elastische Arten bei Umweltveränderungen betroffen sind und im Bestand abnehmen, überrascht es zunächst, dass auch der Eisvogel als r-Stratege bedroht ist. Mit seinem Brutverhalten, dem Anlegen von Nisthöhlen in Steilufern, ist der Eisvogel jedoch an einen dynamischen Lebensraum angepasst, der durch den wechselnden Wasserstand natürlicher Fliessgewässer geprägt wurde und früher weit verbreitet war. Die Regulierung der Flussläufe und Seen hat diese labilen Standorte zum Mangelbiotop werden lassen. Die Gewässerverschmutzung dürfte die Überlebenschancen des Sichtjägers weiter erschweren.

3.2 Das Reh als r-Stratege

Ausgehend von den für das Reh beschriebenen Merkmalen, die direkt oder indirekt einen r- oder K-Bezug anzeigen, erweist sich diese allgemein bekannte Wildtierart verglichen mit andern Vertretern der Cerviden *(Odocoilinae* und *Cervinae)* wie auch mit den drei übrigen einheimischen Wiederkäuern als ausgeprägter r-Stratege. Im Bild 2 ist dieses Merkmalskombinat dargestellt. Bezüglich der erfassten Einzelmerkmale sei verwiesen auf B. Bobek 1977, Drescher-Kaden 1976, K. Eiberle und H. Nigg 1983, D. Eisfeld 1974, 1976, H. Ellenberg 1978, 1979, R.R. Hofmann 1979, F. Klötzli 1965, F. Kurt 1968, H. Müri 1983, H. Strandgaard 1972, D.C. Turner 1979, M.L. Voser und B. Nievergelt 1975.

Das Merkmalskombinat weist das Reh aus als rasch wachsenden und an- ungsfähigen Kulturfolger. Da es allerdings rauhes Futter nicht oder nicht gend rasch aufschliessen kann, ist es auf produktive Flächen mit hoher

rungsqualität angewiesen. Bei diesen Merkmalen ergeben sich für den r-
tegen einerseits Probleme im Winter, wenn die Nahrungsqualität markant
:drigt ist, anderseits aber auch spezifische Konfliktsituationen mit dem
ischen. Wie das Bild zeigt, begegnet das Reh den Anforderungen des Win-
mit einem eigentlichen Strategiewechsel. Der Nahrungsbedarf und der ge-
te Metabolismus werden erniedrigt. Diese innere Umsteuerung findet
ı statt bei gefangenen und optimal gefütterten Tieren. Sozial tolerant, mit
rösserten Spiegel als Beschwichtigungssignal, schliessen sich die Tiere in
er Jahreszeit zu grösseren Verbänden zusammen. Auf diese Weise wird
allgemeine Zugang zur seltener gewordenen und unregelmässiger verteil-
Nahrung erleichtert. Die kraftzehrende Brunft, die bei den übrigen einhei-
:hen Wiederkäuern in den Winter fällt, ist beim Reh mittels Keimruhe
verlängerter Tragzeit in den Sommer vorverlegt.

:onfliktsituationen mit dem Menschen ergeben sich zum einen im Wald.
Reh hat offenkundig nicht das gleiche Idealbild des Waldes wie der För-
Für das Reh hochwertig sind helle und lückige, eine üppige Bodenvege-
›n und Strauchschicht fördernde, aber besonders auch unstabile Wälder
Pioniercharakter. Wenn das Reh aus der Sicht des Menschen Waldscha-
verursacht, schädigt es somit keineswegs seinen eigenen Lebensraum. Ob
ein Zusammenhang besteht mit dem gezielten Schlagen und Verbeissen
tiefwurzelnden Weisstanne, die im Waldbau als stabilisierendes Element
hat allerdings ebenso hypothetischen Charakter wie der oben beschriebe-
lezug zwischen dem Verschieben der aufwendigen Brunftaktivität in den
.mer und dem Strategiewechsel im Winter. Eindeutiger sind indessen die
gen in der Abbildung genannten Konflikt- oder Problemsituationen: die
vierige Gehegehaltung, die Störungen durch Erholungsaktivitäten des
ischen während der Aufzuchtszeit, die Verkehrsopfer vor allem unter den
iere suchenden jungen Böcken.

›er Vergleich des zunächst unstrukturierten reheigenen Merkmalskombi-
s mit der klaren Modellsituation eines r-Strategen dürfte damit für das
tändnis der Art in der Tat eine taugliche Denkhilfe darstellen. Zugleich
ıbt er uns – ähnlich wie beim Beispiel des Eisvogels –, wichtige Problem-
ıtionen zu erkennen. Solche Problemsituationen sind besondere Hinweise
len Wildbiologen beim Formulieren weiterführender Hypothesen und für
Wildhut bei der Suche nach möglichst artgerechten Hegemassnahmen.

---

2 Das Reh – ein r-Stratege. Im zentralen Kreis sind die zur r-Strategie passenden, aus der ▶
ıtur bekannten Merkmale genannt. In der linken Kolonne stehen interpretierte Konsequen-
die zu Problemen zwischen Mensch und Reh führen. Der überlebenssichernde Strategie-
sel im Winter – eine weitere Interpretation – ist als Einbruch in die r-Strategie gezeigt. Ande-
-Tendenzen bezeugende Reh-Merkmale sind dem Autor nicht bekannt.

: The roe deer seen as an r-strategist. The characteristics drawn along the circle-line cor-
nd to the model. To the left there is a list of possible consequences that lead to problems
:en man and roe deer. The framed sector to the right shows changes in the strategy in winter
ı are discussed.

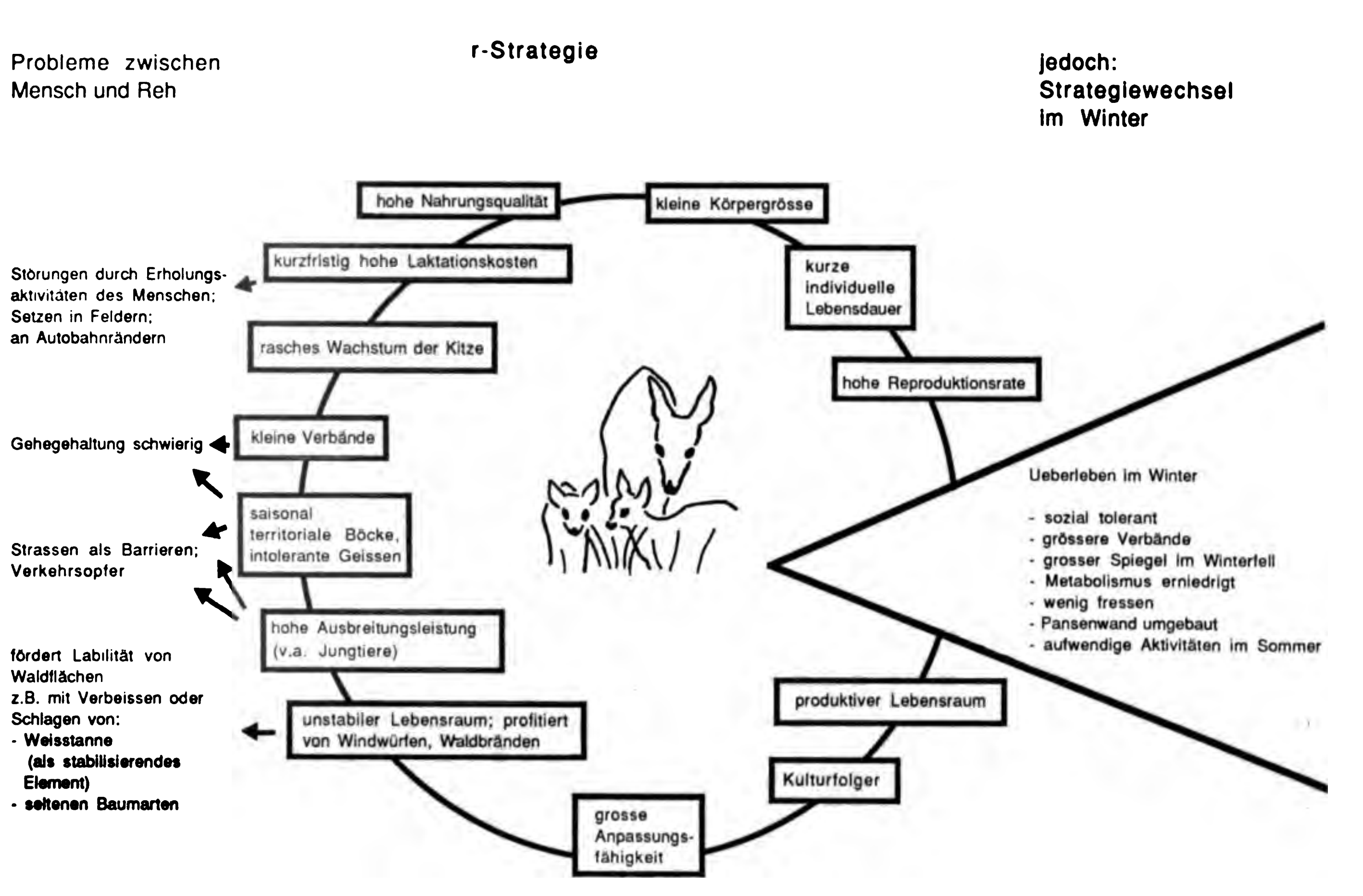

Probleme zwischen
Mensch und Reh
r-Strategie
jedoch:
Strategiewechsel
im Winter
hohe Nahrungsqualität
kleine Körpergrösse
kurzfristig hohe Laktationskosten
kurze individuelle Lebensdauer
rasches Wachstum der Kitze
hohe Reproduktionsrate
kleine Verbände
saisonal territoriale Böcke, intolerante Geissen
hohe Ausbreitungsleistung (v.a. Jungtiere)
unstabiler Lebensraum; profitiert von Windwürfen, Waldbränden
grosse Anpassungsfähigkeit
Kulturfolger
produktiver Lebensraum
Störungen durch Erholungsaktivitäten des Menschen; Setzen in Feldern; an Autobahnrändern
Gehegehaltung schwierig
Strassen als Barrieren; Verkehrsopfer
fördert Labilität von Waldflächen
z.B. mit Verbeissen oder Schlagen von:
- Weisstanne (als stabilisierendes Element)
- seltenen Baumarten
Ueberleben im Winter
- sozial tolerant
- grössere Verbände
- grosser Spiegel im Winterfell
- Metabolismus erniedrigt
- wenig fressen
- Pansenwand umgebaut
- aufwendige Aktivitäten im Sommer

Tabelle 1 Der Alpensteinbock, ein an extreme Umweltbedingungen angepasster K-Stratege.

Table 1 The Alpine ibex, a K-strategist but adapted to an extreme environment.

Merkmal	passend zu r- oder K-Strategie	bei hoher Dichte K-Tendenz verstärkt
geringe Nachwuchsrate	K	*
später Setzbeginn der Geissen	K	*
selten Zwillinge	K	*
langsames Körperwachstum	K	
lange individuelle Lebensdauer	K	*
langsamer Generationen-Turnover	K	*
grosses Gehörn, Zuwachs lebenslang	K	*
Differenzierung in Körpergrösse zwischen Alters- und Geschlechtsklassen	K	
geringe Ausbreitungsleistung	K	
Streifgebiete tradiert	K	
gute potentielle Domestikationsfähigkeit (Lernfähigkeit)	K	
geringe Ansprüche an Nahrungsqualität	K, r	
grosser Magen	K	
Anpassung an extreme (alpine) Umweltbedingungen	K, r	

3.3 Der Steinbock als K-Stratege

Die Merkmale, wie sie in Tabelle 1 zusammengestellt sind, lassen den Alpensteinbock – auch wenn man ihn an Huftierverhältnissen misst – als K-Strategen erscheinen. Neben dem langsamen Körperwachstum – die Böcke sind erst mit rund acht bis zwölf, die Geissen mit fünf bis sieben Jahren ausgewachsen – sind zu nennen die kleine Nachwuchsrate, die späte Geschlechtsreife, die Arealtreue, die damit verbundene schwache Ausbreitungsleistung, die nur geringen Ansprüche an die Nahrungsqualität und die gute Lernfähigkeit (M. A. J. Couturier 1962, H. Kofler 1981, P. Lüps et al. 1986, B. Nievergelt 1966a, 1966b, 1977, B. Nievergelt und R. Zingg 1986, P. Ratti 1981, R. Valdez 1985, S. Zumbach 1986). Zwei weitere Merkmale: der alpine Lebensraum und die stammesgeschichtliche Herkunft als Gletscherfolgertyp (V. Geist 1971) scheinen zunächst eher in das Bild eines r-Strategen zu passen, denn extreme Umweltverhältnisse sind Randbedingungen, bei denen in der Regel r-Qualitäten gefragt sind. Diese Regel gilt jedoch nur begrenzt. Offensichtlich sind auf extreme Umweltbedingungen, wie sie in den Alpen oder auch in der Arktis

herrschen, verschiedene Antworten möglich (R. M. May 1975): r-Strategie, wenn mit hoher Vermehrungsrate der kurze Sommer genutzt oder Arealteile neu besiedelt werden, K-Strategie, wenn die Widerstandskraft der Individuen ausreichen muss, um in kargen Perioden wie im alpinen Winter zu überleben. Es sei hier auf den oben genannten, von R. H. Whittaker (1975) und J. P. Grime (1979) vorgeschlagenen dritten Strategietypus für extreme Habitate verwiesen.

Ein arteigener Regulationsmechanismus, der ähnlich wie beim Alpensteinbock auch bei Wildschafen bekannt ist, äussert sich im Grunde in Form von Positionswechseln auf dem oben genannten r-K-Kontinuum (Geist 1966, 1971, B. Nievergelt 1966a). Die bei diesen Arten besonders gut ausgebildete Regulationsfähigkeit und Flexibilität auf dem r-K-Kontinuum können möglicherweise als zusätzliche Anpassung an extreme Bedingungen interpretiert werden. Jede Population wird – wenn dies richtig ist – durch die herrschenden Verhältnisse innerhalb der Modifikationsbreite auf die optimale Strategie justiert. Bei Populationen zeigen sich in der Entwicklung von geringer zu hoher Dichte folgende Verschiebungen: die Geissen beginnen statt mit 3 (bzw. 2 oder 4) erst mit 4, 5 oder 6 Jahren zu setzen, die Tiere werden älter (nachgewiesen für Böcke, doch gilt es mutmasslich auch für Geissen), der Generationen-Turnover ist damit verlangsamt, das Gehörnwachstum ist in der Jugend geringer, im Alter kräftiger. Auf Grund von Vergleichen zwischen Freikolonien wie auch Gehegen ist zu vermuten, dass auch die Zwillingshäufigkeit abnimmt. Insgesamt zeigen all diese durch Dichteeffekte beeinflussbaren Merkmale bei hoher Dichte eine K-Tendenz. Vereinbar mit dieser Modellvorstellung werden die r-Qualitäten im Rahmen der Reaktionsnorm indessen bewahrt. So kann sich die Nachwuchsrate bei erniedrigter Dichte, oder wenn neue Gebiete besiedelt werden, wiederum erhöhen.

Ausgehend von Tabelle 1 sei auf ein weiteres durch generelle K-Strategie begünstigtes Phänomen hingewiesen: Die lange individuelle Lebensdauer, Lernfähigkeit und Arealtreue erleichtern es dieser Tierart, auf berechenbare Störungen wie auf Fusswegen konzentrierter Tourismus mit Vertrautheit bzw. Verringern der Fluchtdistanz zu reagieren. Die Steinböcke werden damit in diesen Gebieten nicht nur gut beobachtbar und erlebbar, sie erschliessen sich auch zusätzliche Äsungsflächen in von Menschen intensiv begangenen Räumen. Das gilt allerdings nur, wenn dort auf Abschüsse verzichtet wird.

4 Unsere menschliche Gesellschaft: Ansätze zu einer Entwicklung in Richtung K-Strategie

Selbstverständlich zählen die Primaten, gehört insbesondere der Mensch im ıervergleich über das gesamte Tierreich zu den ausgeprägten K-Strategen. enn wir somit bei der Art Mensch, bei unserer Gesellschaft nach einer Ver-bung auf dem r-K-Kontinuum fragen, geht es um subtile Unterschiede

d erneut um relative r- oder K-Strategie. Im unten dargelegten Merkmals-
mbinat sind neben den üblichen biologischen r-K-relevanten Aspekten
ch gesellschaftliche und kulturelle Eigenheiten behandelt. Es ist ein Merk-
ılskombinat, das wir als betroffene Art bewusst erleben, beliebig ergänzen
d auf funktionelle Störelemente – Problemstellen – durchdenken können.
i dieser Anwendung des Modelles wäre es vielleicht richtiger, von r-analo-
r und K-analoger Strategie zu sprechen. Auf diese sprachliche Differenzie-
ng wird aus Gründen der Einfachheit jedoch verzichtet. Es sei ausserdem
tont, dass diese Ausführungen rein hypothetischen Charakter haben. Aus
esem Grund geht es in diesem Beitrag nur darum zu prüfen, inwiefern die-
s einfache r-K-Modell auch tauglich ist, um mutmassliche Problemstellen
serer menschlichen Gesellschaft zu orten oder in einem vielleicht neuen
cht zu sehen. Dieser Versuch sei hier gewagt.

Ausgehend davon, dass mit der ganzen industriellen und wirtschaftlichen
ıtwicklung ein enormes Bevölkerungswachstum eingeleitet wurde und sich
hlreiche und ausgedehnte Ballungszentren bildeten, in denen der Platz zu-
hmend knapper wird, erscheinen die Rahmenbedingungen für eine Ent-
cklung in Richtung K-Strategie gegeben. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich un-
er Gesellschaft in der vorindustriellen Phase mit unserer modernen Indu-
ie- und Konsumgesellschaft. Etwas weniger ausgeprägt und mit einigen
ırbehalten lässt sich die Tabelle auch als Gegenüberstellung zwischen Land-
d Stadtleben verstehen. In ähnlicher Art liesse sich die Situation in Japan
r und nach der industriellen Revolution vergleichen. Verschiebungen auf
r r-K-Achse dürften von r nach K in der Regel wohl als allmähliche Prozes-
von K nach r dagegen eher unvermittelt, umbruchartig erfolgen, zum Bei-
iel ausgelöst durch Kriege, Katastrophen oder plötzliche Zugänglichkeit
uer Ressourcen. In analoger Weise erfolgen die von R. Ricklefs and
W. Cox 1972 postulierten Taxon-Zyklen auf Inseln: allmählich im Diffe-
ızierungsprozess, katastrophenartig zum Neubeginn.

In einem anregenden Beitrag behandelt H. Markl (1983) die Frage der Ent-
tung und Begrenzung von Populationen und zielt dabei auf das Verhalten
r menschlichen Bevölkerung. Er beschreibt den Menschen als extremen K-
rategen, bei dem sich der bei den Säugetieren und insbesondere den Prima-
ı erkennbare evolutionäre Prozess auf überbehütete Nachkommen in der
ılturrevolution fortsetzt. H. Markl betont allerdings, dass die verminderte
achstumsrate des K-Strategen keineswegs auf Selbstbeschränkung beruht.
ıch K-Strategen maximieren ihre reproduktive Fitness – so gut es eben geht.
ı Bereich der Kapazitätsgrenzen sind die Wachstumsmöglichkeiten aller-
ngs gering, und so stehen andere Qualitäten im Vordergrund. Beim K-Stra-
gen Mensch haben stets neue, von ihm erschlossene Ressourcen die Bevöl-
rungsexplosion ermöglicht bzw., im Sinne der in diesem Artikel postulier-
ı breiten Reaktionsnorm auf der r-K-Achse, ein teilweises und folgenschwe-
s Annehmen von r-Tendenzen zugelassen. Unter K-Strategie wird hier bei
r Konfrontation des Modelles mit unserer Gesellschaft deshalb das bewuss-

Tabelle 2 Die Entwicklung unserer menschlichen Gesellschaft im Lichte der r-K-Strategien. Ein Vergleich zwischen der vorindustriellen Kultur mit der modernen Industrie- und Konsumgesellschaft.

Table 2 The development and changes in strategy of our human society which are discussed.

Vorindustrielle Kultur (Landleben, Leben im alpinen Raum)	Industrie- und Konsumgesellschaft (Stadtleben)
r-Strategie	K-Strategie
wenige, aber vielseitige Berufe (v.a. Bauer)	viele spezialisierte Berufe, Teamarbeit
einfaches System	komplexes System
Siedlungsdichte ist meist gering	Besiedlungsdichte liegt im Bereich der Kapazitätsgrenze
Auseinandersetzung mit dem Lebensraum	zwischenmenschliche Auseinandersetzung, Konkurrenz
Variabilität in den Umweltbedingungen toleriert	Konstanz in den Umweltbedingungen erwartet
Überschwemmungen werden als natürliches Ereignis betrachtet	Überschwemmungen gelten primär als Katastrophe bzw. Folge einer Fehlplanung
früh heiraten	spät heiraten
viele Kinder	wenig Kinder
einfache Schulung	differenziertes Schulsystem mit hoher Priorität
geringere Lebenserwartung	höhere Lebenserwartung
Einzelschicksal weniger wichtig	hohes Sicherheitsbedürfnis
fehlende Todesfurcht bei früheren Kriegern	«Versicherungsboom», keine Todesstrafe
→ Fortschritt? →	

te Sichausrichten auf ein funktionell möglichst abgestimmtes, störungsfreies K-Merkmalskombinat verstanden.

In den urbanen Zentren zeigt sich auf Grund von Tabelle 2 eine K-Tendenz, die sich in zahlreichen Merkmalen niederschlägt. Diese Entwicklung und die mit der erreichten hohen Bevölkerungsdichte samt Wettstreit um Boden und andere knappe Ressourcen letztlich unumgängliche Änderung in der Grundhaltung ist mit spezifischen Problemen verbunden, mit denen wir in unserer Stammes- und Kulturgeschichte bisher in diesem Ausmass nie konfrontiert waren. Wir sind damit genetisch und kulturell schlecht gerüstet. Die zunehmende Spezialisierung in den Berufen bedeutet ein Schmälern der Nischen, eine nurmehr sehr sektorielle Betrachtung der Umwelt, die uns von der Natur wegführt. Als Spezialisten auf konstante Verhältnisse angewiesen, reagieren wir empfindlich auf Veränderungen. Flexibilität geht verloren, das Verständnis für natürliche dynamische Prozesse schwindet. Wir versagen zunehmend bei Auseinandersetzungen mit der Natur, indem wir einen Kompromiss

suchen, den es gar nicht geben kann. Probleme mit der Umwelt lassen sich nicht im Sinne von zwischenmenschlichen Auseinandersetzungen bereinigen.

Betrachtet man weitere Merkmale unserer Gesellschaft, zeigt sich nun allerdings sehr rasch, dass die Ziele unserer Gesellschaft nicht oder noch nicht ganzheitlich an einer K-Strategie orientiert sind. In der Tabelle 3 sind mit einer K-Strategie konforme Ziele aufgelistet, ebenso solche Ziele, die damit nicht vereinbar sind. Zu nennen sind unter diesen Zielen vor allem unsere vermeintliche Abhängigkeit von dauerndem wirtschaftlichen Wachstum und unsere Art zu planen. Wir stützen uns ab auf bisherige Tendenzen, extrapolieren und leiten Bedürfnisse daraus ab. Notwendigerweise stehen sehr rasch eine Vielzahl der durch dieses Vorgehen ausgewiesenen Bedürfnisse miteinander in Konflikt. Die Planungsbasis ist damit untauglich. Im Bereich der Grenzen unserer Ressourcen muss die Planung an der Gesamtkapazität, an einer Zukunftsvorstellung orientiert sein. Planung in dieser Situation kann nur heissen: Verteilen der Bedürfnisse, Bewerten, Rationieren; es heisst somit auch Prioritätsnachweis anstelle von Bedürfnisnachweis. Ebenso konfliktträchtig ist das dauernde wirtschaftliche Wachstum, das bei begrenzten Ressourcen nur auf Kosten anderer Werte möglich ist. Grenzenbewusstsein und geeignete Rahmenbedingungen müssen eine K-konforme, stabilitätsorientierte Wirtschaft begünstigen.

Tabelle 3 Verträglichkeit und Aktualität der Gesellschaftsziele mit dem Modell einer bewussten K-Strategie

Table 3 Characteristics of our society that are "up to date" and "out of date" with the model of a consciously followed K-strategy.

Im Sinne der letztlich unerlässlichen K-Strategie sind als Gesellschaftsziele bzw. als Gesellschaftsmodell

up do date

Stabilität
Orientierung an Kapazitätsgrenzen
Grenzenbewusstsein
Rationieren endlicher Güter
Effizienz
Qualität in der Ausbildung
Vernetzte Arbeitsteilung
Sorgfalt im Nutzen der Ressourcen
Planung orientiert an Zielvorstellung
Prioritätsnachweis

out of date

Quantität
Dynamik
dauerndes Wachstum
Planung orientiert an bisherigen Tendenzen und Bedürfnissen
Bedürfnisnachweis

Nun gibt es allerdings Teilbereiche in unserer menschlichen Gesellschaft, in denen r-Strategie nicht anstösst, bei denen Wachstumsprozesse keine begrenzten Güter beanspruchen. Zu nennen sind Kunst, Ethik, Kultur, Forschung, Wissen. r-Qualitäten wie Wachstum und Produktivität sind hier weiterhin gefragt. Eine anscheinend fast zwingende Entwicklung entlang des r-K-Gradienten zu einer konkurrenzstarken, aber wenig produktiven K-analogen Strategie lässt sich bei konstanten Aussenbedingungen aber auch bei Forschungsinstituten entdecken, wie P. H. Enckell (1982) in einer gescheiten wissenschaftlichen Satire darlegt.

5 Schlussbemerkung

Es ist wohl von vornherein nicht möglich, mit einem einfachen Modell eine Tierart oder ein System wie unsere Gesellschaft umfassend zu beschreiben und zu verstehen. Nur ein hochkomplexes Modell könnte theoretisch einem solchen Anspruch näherungsweise gerecht werden. Modelle dieser Art sind als Stütze für unsere Vorstellungskraft jedoch zumeist untauglich, vor allem aber sind sie nicht über den Einzelfall hinaus breiter anwendbar. Sie wurden deshalb in diesem Beitrag nicht berücksichtigt.

Einfache, aber dafür durchsichtige und breit anwendbare Modelle können im Einzelfall nicht mit der verwirrend vernetzten Wirklichkeit übereinstimmen. Indessen bieten sie lohnende Denkhilfen, die zu neuen Ansätzen und Hypothesen führen können; Ansätze, die es auch erlauben, einen Gesichtspunkt aus einer bestimmten Perspektive einer Tierart zu denken und auf diese Weise spezifische Umweltprobleme dieser Tierart, damit eines uns fremden Systems, zu orten.

Wenn sich einzelne Merkmale mit der Modellvorstellung nicht vereinbaren lassen, besteht damit auch kein Anlass, das Modell zu disqualifizieren. Anhand der behandelten Beispiele wurde zu zeigen versucht, dass gerade die vom Modell abweichenden Merkmale wichtige Fingerzeige für spezielle Anpassungsleistungen oder Besonderheiten liefern können.

6 Literatur

Bobek B., 1977: Summer food as the factor limiting roe deer population size. Nature *268:* 47–49.

Bruderer B. und Thönen W., 1977: Rote Liste der gefährdeten und seltenen Vogelarten der Schweiz. Orn. Beob. *74*, Beiheft.

Couturier M. A. J., 1962: Le Bouquetin des Alpes; Grenoble, 1564 pp.

Drescher-Kaden U., 1976: Untersuchungen am Verdauungstrakt von Reh, Damhirsch und Mufflon: Z. Jagdwiss. *22:* 184–190.

iberle K. und Nigg H., 1983: Über die Folgen des Wildverbisses an Fichte und Weisstanne in *montaner Lage; Schweiz. Z.* Forstwes., *134*, 5: 361–372.

Eisfeld D., 1974: Der Proteinbedarf des Rehes zur Erhaltung. Z. Jagdwiss. *20:* 43–48.
Eisfeld D., 1976: Ernährungsphysiologie als Basis für die ökologische Beurteilung von Rehpopulationen; Rev. Suisse de Zool. *83:* 914–928.
Ellenberg H., 1978: Zur Populationsökologie des Rehes (Capreolus capreolus L., Cervidae) in Mitteleuropa; Spixiana, Zool. Staatssammlung, München, 211 pp.
Ellenberg H., 1979: Mitten im Sommer können Rehe verhungern mit vollem Pansen; Jäger, Sept.
Enckell P.H., 1982: Development and Strategies of Scientific Institutes; Bulletin, Brit. Ec. Soc. Vol. *13*, 1, pp 16–20.
Geist V., 1966: The Evolutionary Significance of Mountain Sheep Horns; Evolution, Vol. *20*, No 4, pp 558–566.
Geist V., 1971: Mountain Sheep. Univ. of Chicago Press, Illinois, 383 pp.
Glutz von Blotzheim U.N. (Hrsg.), 1980: Handbuch der Vögel Mitteleuropas, Bd. *9*, Columbiformes-Piciformes; 1148 pp. Akad. Verlagsges. Wiesbaden.
Grime J.P., 1979: Plant Strategies and Vegetation Processes, J. Wiley, Chichester, New York, Brisbane, Toronto.
Hofmann R.R., 1979: Die Ernährung des Rehwildes im Jahresablauf. Tierärztl. Praxis *7*, 507–522.
Horn H.S. and Rubenstein D.I., 1984: Behavioural Adaptations and Life History 279–298 in: J.R. Krebs and N.B. Davies (eds): Behavioural Ecology. An Evolutionary Approach, 493 pp. Blackwell, Oxford, London (second ed).
Klötzli F., 1965: Qualität und Quantität der Rehäsung; Veröff. Geobot. Inst. ETH, 38, Zürich.
Kofler Hugo, 1981: Ökologisch-vegetationskundliche Untersuchungen zur Nahrungswahl und Konkurrenz von Gams (Rupicapra rupicapra L.) und Steinbock (Capra ibex L.) im Hochlantschstock/Steiermark. Dissertation, Universität Graz, 139 Seiten.
Kurt F., 1968: Das Sozialverhalten des Rehes. Mammalia depicta, Parey, Hamburg.
Lüps P., Brüllhardt H., Zuber M., Zumbach S., 1986: Sonderabschüsse von Steinwild (Capra ibex) im Berner Oberland – Erste Erfahrungen und Resultate; Z. Jagdwiss., Bd. *32*, H. 3, S. 148–157.
Mac Arthur R.H. and Wilson E.O., 1967: The theory of Island Biogeography; Princeton University Press, 203 pp.
Mahn E.-G., 1986: Selektionsstrategien bei pflanzlichen Populationen; S. 218/219; in: Schubert R. (Hrsg.): Lehrbuch der Ökologie. VEB G. Fischer, Jena. 2. Aufl.
Markl H., 1983: Die Dynamik des Lebens: Entfaltung und Begrenzung biologischer Populationen; in: H. Markl (Hrsg.): Natur und Geschichte, Oldenbourg Verlag München, Wien, S. 71–100.
May R.M., 1975: Stability in Ecosystems: Some comments; pp 161–168, in: W.H. v. Dobben and R.H. Low-McConnell: Unifying concepts in Ecology; W. Junk, The Hague.
Müri H., 1983: Futter-Tradition beim Reh. Dissertation, Universität Zürich.
Nievergelt B., 1966a: Der Alpensteinbock (Capra ibex L.) in seinem Lebensraum. Ein ökologischer Vergleich. 85 S. Mammalia depicta. Hamburg, Berlin.
Nievergelt B., 1966b: Unterschiede in der Setzzeit beim Alpensteinbock (Capra ibex L.). Rev. Suisse Zool. *73*, 446–454.
Nievergelt B., 1977: Steinböcke – scheu oder vertraut? Nationalpark *3:* 11–15.
Nievergelt B. und Zingg R., 1986: Capra ibex Linnaeus, 1758 Steinbock; in: Handbuch der Säugetiere Europas, Band *2/II* (Paarhufer), Aula-Verlag GmbH, Wiesbaden, S. 384–404.
Odum E.P., 1971: Fundamentals of Ecology, 3rd Ed., Saunders Co., Philadelphia, London, Toronto, 574 pp.
Pianka E.R., 1970: On r- and K-Selection: Am. Naturalist *104:* 592–597.
Putman R.J. and Wratten S.D., 1984: Principles of Ecology; Croom Helm, London and Canberra.
Ratti P., 1981: Zur Hege des Steinwildes im Kanton Graubünden. Z. Jagdwiss. *27*, 41–57.
Ricklefs R.E. and Cox G.W., 1972: Taxon Cycles in the West Indian avifauna; Amer. Nat. *106:* 195–219.
Schulze E.-D., 1982: Plant Life Forms and Their Carbon, Water and Nutrient Relations (pp 615–676), in: O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond and H. Ziegler: Physiological Plant Ecology II; Springer – Berlin, Heidelberg, New York.

Southwood T. R. E., May R. M., Hassell M. P. and Conway G. R., 1974: Ecological Strategies and Population Parameters; Am. Naturalist *108*, 791–804.

Strandgaard H., 1972: The roe deer (Capreolus capreolus) population at Kalo and the factors regulating its size; Danish Rev. Game Biol. *7*, 205 pp.

Turner D.C., 1979: An Analysis of Time-Budgeting by Roe deer (Capreolus capreolus) in an Agricultural Area. Behaviour *71*, 3–4, p. 246–290.

Valdez Raul, 1985: Lords of the Pinnacles; Wild goats of the World, Box 244, Mesilla, New Mexico, 212 pp.

Voser M. L. and Nievergelt B., 1975: Das Futterwahlverhalten des Rehes in einem voralpinen Revier; Z. Jagdwiss. *21*, S. 197–215, P. Parey Hamburg, Berlin.

Whittaker R. H., 1975: The design and stability of plant communities, pp. 169–181; in: W. H. v. Dobben and R. H. Lowe-McConnell: Unifying concepts in Ecology; W. Junk, The Hague.

Zumbach Sylvia, 1986: Körpermasse von Steinwild Capra ibex L. aus dem Berner Oberland (Schweiz, Abschüsse 1980–1984). Kleine Mitteilungen, Naturhistorisches Museum, Bern, 14 Seiten.

hard Nievergelt, Ethologie und Wildforschung, Universität Zürich-Irchel II, Winter-
[illegible], 8057 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135*/1: 47–61

Martin Wagenscheins naturphilosophischer Ansatz

Peter Stettler, Kantonsschule Freudenberg, Zürich

In der Einleitung wird kurz Martin Wagenscheins pädagogisches Wirken geschildert, in dessen Zentrum das ursprüngliche Verstehen und exakte Denken steht. Das Verstehen der Physik gelingt nur, wenn diese nicht als voraussetzungslos, sondern sich selbst auf das Messbare beschränkend betrachtet wird. Die Selbstbeschränkung ihrer Disziplin scheinen viele Physiker wenig zu beachten, wenn sie z. B. aus einer einheitlichen Theorie des Universums dessen Sinn deuten wollen. Wagenscheins philosophisches Interesse gilt der Hervorbringung der Physik aus der Lebenswelt. Dieser Erkenntnisweg wird am Beispiel eines Saitenklangs geschildert. Bei der Frage nach dem Wesen des Lichts wird in wagenscheinscher Art darauf hingewiesen, dass das Licht «an sich» gar nicht sichtbar ist. Dadurch wird der Gleichnis-Charakter von Lichtwellen oder Photonen und deren komplementäres Verhältnis auch vom «Anfänger» mühelos erkannt. Das eigentlich Bildende im wissenschaftlichen Umgang mit der Natur sieht Wagenschein in deren Verstehbarkeit, in der Entdeckung der rätselhaften Ordnung des Kosmos.

Martin Wagenschein's Nature-Philosophical Approach

In the introduction we briefly describe the pedagogical work of Martin Wagenschein, in whose centre stands original understanding and precise thinking. The process of understanding physics can only succeed if it is not regarded without certain presumptions, but as limiting itself on the measurable. It is this self-limitation of their subject that many physicists seem do disregard, if they want to interpret a meaning of the universe from its unified theory. Wagenschein's philosophical interest centres on the creation of physics from the living world. This epistemological path is described in the example of a cord's sound. On the question about the nature of light it is pointed out in a Wagenscheinian manner that light as such is not visible. By this means even the beginner will realize the parabolic character of light-waves and photons and their complementary relationship. Wagenschein sees the true pedagogical value in the understandability of nature, in the discovery of an enigmatic order in the universe.

1 Einleitung

Martin Wagenschein (1896–1988) gehört zweifellos zu den grössten Pädagogen unserer Zeit. Schon als junger Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik fiel ihm die «fast abenteuerliche Hinfälligkeit der Kenntnisse» seiner Schüler auf, die er als Folge einer zu schnellen und daher oberflächlichen Erledigung einer zu grossen Stoffülle erkannte. Zwischen 1923 und 1933 war er Mitarbeiter an Paul Geheebs Odenwaldschule, einer freien Schulgemeinde mit Epochenunterricht, Koedukation (im Internat!) und ohne Noten und Strafen. Dort entwickelte er seine eigenen pädagogischen Ideen. Nach der Machtergreifung der Nazis flüchtete Geheeb in die Schweiz und gründete die Ecole d'Humanité, die ihren Platz nach einer beschwerlichen Odyssee schliesslich auf dem Hasliberg im Berner Oberland fand. Wagenschein blieb in Deutschland und half am staatlichen Gymnasium einer verunsicherten Jugend über die schwere Zeit. Nach dem Krieg arbeitete er an Bildungsreformen und Schulversuchen in Deutschland. Insbesondere gehörte er um 1951 zu den Be-

gründern des Exemplarischen Unterrichts. Um dieses Unterrichtsprinzip genauer thematisieren zu können, schuf er die Begriffs-Trias *«genetisch-sokratisch-exemplarisch»: Das Genetische* «gehört zur Grundstimmung des *Pädagogischen* überhaupt. Pädagogik hat mit dem Werdenden zu tun: mit dem werdenden Menschen und – im Unterricht, als Didaktik – mit dem Werden des Wissens in ihm. Die *sokratische* Methode gehört dazu, weil das Werden, das Erwachen geistiger Kräfte, sich am wirksamsten im Gespräch vollzieht. Das *exemplarische* Prinzip gehört dazu, weil ein genetisch-sokratisches Verfahren sich auf exemplarische Themenkreise beschränken muss und auch kann. Denn es ist – ich sage nicht ‹zeitraubend›, sondern – ‹musse-fordernd› und deshalb von hohem Wirkungsgrad» (Wagenschein, 1968/1989). Seit 1950 war Wagenschein in Darmstadt, Tübingen und Frankfurt auch als Hochschullehrer tätig. In seinem legendären Darmstädter Seminar, das er bis zu seinem 90. Lebensjahr durchführte, brachte er durch seine unbequemen sokratischen Fragen und seine bis ans Skandalöse reichende Geduld sowohl Studenten wie auch Professoren zum «ursprünglichen Verstehen und exakten Denken» (W, 1965, 1970)[1]. Durch diesen Anspruch wurde er fast zwangsläufig immer wieder zu naturphilosophischen und erkenntnistheoretischen Fragen geführt.

2 Grenzen und Grenzübertritte naturwissenschaftlicher Erkenntnis

Wenn ich über erkenntnistheoretische Aspekte im Lebenswerk[2] von Martin Wagenschein spreche, geschieht das aus dem Grund, weil ich durch ihn Physik und Mathematik in neuem Lichte sah. Ich habe zwar Physik studiert, war dann während 5 Jahren in der physikalischen Grundlagenforschung tätig und einige Jahre als Physiklehrer am Gymnasium

– «Und ziehe schon an die zehen Jahr'
Herauf, herab und quer und krumm
Meine Schüler an der Nase herum» – (Goethe, Faust I)

als ich im Spätherbst 1975 eine pädagogische Tagung mit dem Titel «Rettet die Phänomene» besuchte. Dort habe ich zum ersten Mal vernommen, was ich eigentlich schon lange hätte wissen müssen: «Physik ist nur einer – wenn auch der mächtigste – der möglichen Natur-Aspekte; nicht voraussetzungslos, sondern zum vornherein sich selbst beschränkend auf das mit Massstab, Waage und Uhr Messbare, soweit wir so Gemessenes in mathematisierten Strukturen miteinander in Beziehung setzen, einander zuordnen können. Es entsteht so ein besonderes ‹Natur-Bild›, eine ‹Denkwelt› können wir auch sagen ... Nach Vergleichen, die von Physikern selbst herrühren, bildet es die uns umgebende sinnenhafte Wirklichkeit der Phänomene so ab wie eine

[1] Wagenscheins Werke werden im folgenden mit «W» aufgeführt.

[2] Der Wortlaut des Vortrags, den der Verfasser am 3. Juli 1989 anlässlich der dritten Martin-Wagenschein-Tagung des Weltbundes für Erneuerung der Erziehung an der Ecole d'Humanité in *Goldern-Hasliberg hielt*, wurde weitgehend beibehalten.

Landkarte die Landschaft, wie die Partitur eine Symphonie, wie der Schatten seinen Gegenstand. Dabei aber bildet es so scharf und so richtig ab, wie eben der Schatten eines Blütenbaumes an der Mauer sich abzeichnet. Nur: Der Baum selber kann der Schatten nicht sein wollen. Von nur seiner Struktur, seiner Geometrie, ist etwas geblieben, aber es fehlen Farbe und Duft, Räumlichkeit und das Rauschen seiner Blätter» (W, 1980).

Die meisten Naturwissenschaftler scheinen allerdings Mühe zu haben, die grundsätzliche Selbstbeschränkung ihrer Disziplin anzunehmen. Dazu einige Zeilen aus dem Schluss des grossartigen Buches «Die ersten drei Minuten» vom Physiknobelpreisträger des Jahres 1979, Steven Weinberg. Es handelt von der Entstehung des Universums.

Er beschreibt fast poetisch eine Abendstimmung und fährt dann fort: «Man begreift kaum, dass dies alles nur ein winziger Bruchteil eines überwiegend feindlichen Universums ist. Noch weniger begreift man, dass dieses gegenwärtige Universum sich aus einem Anfangszustand entwickelt hat, der sich jeder Beschreibung entzieht und seiner Auslöschung durch unendliche Kälte oder unerträgliche Hitze entgegengeht. Je begreiflicher uns das Universum wird, um so sinnloser erscheint es auch. Doch wenn die Früchte unserer Forschung uns keinen Trost spenden, finden wir zumindest eine gewisse Ermutigung in der Forschung selbst ... Das Bestreben, das Universum zu verstehen, hebt das menschliche Leben ein wenig über eine Farce hinaus und verleiht ihm einen Hauch von tragischer Würde» (Weinberg, 1977).

Ein wahrhaft faustischer Erkenntniskater! Aber hätte Weinberg denn je Grund zur Hoffnung haben können, aus der physikalischen Betrachtung des Universums einen Sinn zu sehen? Ist die Bedeutung des menschlichen Daseins an nichts anderem zu ermessen als aus Zahlenvergleichen in Raum und Zeit?

Der berühmte englische Physiker Stephen Hawking widmet in seinem Bestseller «Eine kurze Geschichte der Zeit» einige Zeilen der philosophischen Reflexion über wissenschaftliche Theorien: «Wenn wir uns mit der Beschaffenheit des Universums befassen und Fragen erörtern wollen wie die nach seinem Anfang oder seinem Ende, müssen wir eine klare Vorstellung davon haben, was eine wissenschaftliche Theorie ist ... Eine Theorie existiert nur in unserer Vorstellung und besitzt keine andere Wirklichkeit. Gut ist eine Theorie, wenn sie zwei Voraussetzungen erfüllt: Sie muss eine grosse Klasse von Beobachtungen auf der Grundlage eines Modells beschreiben, das nur einige wenige beliebige Elemente enthält, und sie muss bestimmte Voraussagen über die Ergebnisse künftiger Beobachtungen ermöglichen ...» (Hawking, 1988). Und weiter: «Letztlich ist es das Ziel der Wissenschaft, eine einzige Theorie zu finden, die das ganze Universum beschreibt.» Die einheitliche Theorie des Universums, die schon Einstein und Heisenberg vorschwebte, ist die in mathematische Form geronnene Idee des Einen. In der neopositivistischen Sprache heisst sie GUT (Grand Unified Theory), wodurch die platonische Herkunft dieser Idee kaum mehr zu erkennen ist. Diese radikale Vereinheitli-

chung der Physik nimmt Hawking weit ernster als seine Reflexionen über Theorien: «Es gibt jedoch ein grundlegendes Paradoxon bei der Suche nach einer vollständigen einheitlichen Theorie. Die Vorstellung über wissenschaftliche Theorie, wie sie oben dargelegt wurde, setzt voraus, dass wir vernunftbegabte Wesen sind, die das Universum beobachten und aus dem, was sie sehen, logische Schlüsse ziehen können. Diese Vorstellung erlaubt es uns, davon auszugehen, dass wir die Gesetze, die das Universum regieren, immer umfassender verstehen. Doch wenn es tatsächlich eine vollständige einheitliche Theorie gibt, würde sie wahrscheinlich auch unser Handeln bestimmen. Deshalb würde die Theorie selbst die Suche nach ihr determinieren! Und warum sollte sie bestimmen, dass wir aus den Beobachtungsdaten die richtigen Folgerungen ableiten? . . .»

Wie können Gesetze, die ja nur in unserer Vorstellung existieren, das Universum «regieren»? Ein freudscher Versprecher oder ein Rückfall in ein magisch-animistisches Weltbild: Naturgesetze als die Götter unserer Zeit? Die Situation ist entsprechend unheimlich, aber Hawking wäre kein Experte seines Fachs, wenn er sich seiner Irritation einfach so stellen würde, und die Wissenschaft als kognitiver Dienstleistungsbetrieb lässt ihn nicht im Stich: «Die einzige Antwort, die ich zu diesem Problem weiss, beruht auf Darwins Prinzip der natürlichen Selektion.»

Wenn Darwins Selektionstheorie eine naturwissenschaftliche Theorie ist, dann müsste sie eine Teiltheorie der GUT sein, und Hawkings Logik hätte sich in den Schwanz gebissen. Was die naturwissenschaftliche Begründung des Darwinismus betrifft, hat der Zürcher Philosoph Gerhard Huber diese kritisch unter die Lupe genommen: «Mit dem Selektionsgedanken überträgt Darwin das Modell der Tier- und Pflanzenzucht auf die Natur . . . Darwins Leitmotiv ist also anthropomorphen oder technomorphen Ursprungs.» Die Idee des Kampfes ums Dasein, die das Selektionsprinzip begründen soll, hat Darwin aus der Bevölkerungstheorie von Thomas Malthus übernommen: «. . . sie reflektiert eine Gesellschaftsauffassung, nach der die Individuen primär einander feindlich gegenüberstehen – der Reflex der bürgerlichen Konkurrenzgesellschaft in der Zeit des Manchester-Liberalismus» (Huber, 1981).

Nachdem Hawking (wie übrigens viele Naturwissenschaftler) den Darwinismus zu einer Art Ersatzreligion emporstilisiert hat, ist es nur ein kleiner Schritt bis zum Schlusssatz seines Kapitels «Ursprung und Schicksal des Universums»: «Wenn das Universum wirklich in sich selbst abgeschlossen ist, wenn es wirklich keine Grenze und keinen Rand hat, dann hätte es auch weder einen Anfang noch ein Ende. Es würde einfach *sein.* Wo wäre dann noch Raum für einen Schöpfer?»

Weinberg und Hawking sind Frontkämpfer der Physik; sie sind an der oberen Grenze tätig, an der Grenze des Fortschritts, wo Wissen aus Nichtwissen zu entstehen scheint. Wer sich in solchen Höhenlagen aufhält, scheint oft wenig Zeit und Anlass zu haben, sich um andere Grenzen der Erkenntnis zu kümmern. Es gibt jedoch eine weitverbreitete naturwissenschaftliche Haltung,

elche alle Grenzen der Erkenntnis (ausser der Grenze des Fortschritts) in brede stellt: der Reduktionismus, zu dem sich Hawking implizite bekennt: Wenn es tatsächlich eine vollständige einheitliche Theorie gibt, würde sie ahrscheinlich auch unser Handeln bestimmen.»

Noch radikalere Vertreter dieser im Wissenschaftsbetrieb sehr häufig anzueffenden Spezies behaupten, dass sich die Geschichte der Menschheit auf e Sozialwissenschaft, die Sozialwissenschaft auf die Psychologie, die Psyologie auf die Neurobiologie, die Biologie auf die Chemie, die Chemie auf e Physik und diese letztlich auf die GUT reduzieren lässt. (Dazu gibt es eine hweizerische Volksgeschichte: «Joggeli söll ga Birli schüttle».) Walter Heitr, Ordinarius für theoretische Physik an der Universität Zürich bis 1974, andte sich in rund der Hälfte seiner tiefsinnigen naturphilosophischen hriften gegen die Reduktion des Phänomens «Leben» auf Chemie und Phyk (– übrigens auch gegen die Kernenergie): «Die mechanistische Weltsicht : Schuld am Leben und Schuld am Menschen» (Heitler, 1970). Der ebenfalls Zürich tätige Quantenchemiker Hans Primas gibt in einem Vortrag den m Reduktionismus am häufigsten hypnotisierten Molekularbiologen zu beenken, dass die Quantenmechanik, als zuständige Theorie für das Verhalten r molekular organisierten Materie, den Reduktionismus als Widerspruch zu ner komplementären Betrachtungsweise, wie sie die Quantenmechanik bengt, entlarvt:

«Wenn man sich schon auf die Quantenmechanik als Grundlage beruft, uss man auch zur Kenntnis nehmen, dass gemäss unserem heutigen Verändnis dieser Theorie sowohl dem Atomismus als auch jeder reduktioniisch-mechanistischen Philosophie längst die naturwissenschaftliche Basis itzogen ist. Die materielle Welt ist keineswegs aufgebaut aus unabhängig istierenden Elementarsystemen, wie etwa Quarks, Elektronen, Atomen oder olekülen, sie erlaubt lediglich unter ganz speziellen experimentellen Bedingen eine Beschreibung durch solche kontextabhängigen Entitäten. Es gibt er auch grundsätzlich andere, zur molekularen komplementäre Beschreingen der Materie, welche quantentheoretisch genauso wohlbegründet und rbindlich sind. Das heisst, die Quantentheorie bietet viel reichere Möglichiten, als in der Weltsicht der Molekularbiologie zur Diskussion zugelassen nd» (Primas, 1987).

Die Idee der Komplementarität hat uns die Augen geöffnet, die Abgrenngen im Gebäude der Naturwissenschaft nicht so sehr zwischen den Fäern Physik, Chemie und Biologie zu sehen als vielmehr in zueinander komementären Betrachtungsweisen der Phänomene. Der Basler Biologe Adolf ortmann schildert die komplementäre Arbeitsweise der Biologie in einem hönen Gleichnis: «Wir betrachten das Leben der Organismen wie ein komliziertes Drama, das vor uns aufgeführt wird. Dieser Aufführung kann ich ntweder im Zuschauerraum beiwohnen oder hinter den Kulissen. Das sind wei ganz verschiedene Standorte, und was man zu sehen bekommt, ist von jeem Orte aus etwas völlig anderes. Und auf beiden Standorten kann ich a

Zuschauer oder Zuhörer verweilen oder nach wissenschaftlichen Grundsätzen forschend mich verhalten» (Portmann, 1964). «Die Einheit der Naturwissenschaft kann nicht dadurch erreicht werden, dass aus dem komplizierten Gegenstand, der Biologie, nur der Teil herausgeschnitten wird, der mit den Methoden der Physik und Chemie zugänglich ist. Zur sinnlich erfassbaren Natur gehört das gesamte Reich des Lebens – zur Biologie gehört die Notwendigkeit, mit komplementären Arbeitsweisen auf verschiedenen Wegen die Tatsachen der Struktur sowohl wie die der Innerlichkeit zu erforschen» (Portmann, 1960).

Damit sind wir Martin Wagenscheins naturphilosophischem Ansatz schon sehr nahe gekommen. Es bedarf kaum der Erwähnung, dass auch er sich gegen den Reduktionismus stellt und dabei auf Heitler und Portmann verweist, auch auf Theodor Litt. Hans Primas hat er nicht mehr gekannt, aber ich zweifle nicht, dass sie sich einig gewesen wären. Wagenschein weist aber in erster Linie – und es würde mir nicht schwerfallen, dazu einige Dutzend Stellen aus seinem Werk zu zitieren – auf eine weitere fundamentale Grenze naturwissenschaftlicher Erkenntnis hin: «Ich empfehle deshalb, ausser der abstrakten Zone (die man sich ‹oben› vorstellen darf) und den Grenzzonen (den ‹seitlich› liegenden) eine andere Zone nicht zu vergessen. Sie ist *unten* anzusiedeln, sie ist die Zone, auf der alles ruht. Sie verbindet die grundlegenden naturwissenschaftlichen Erkenntnisse – ich meine damit die *zuerst* sich darbietenden – mit unseren Alltagserfahrungen, unserem Alltagsverstand. Und unserer Alltags*sprache*... Bildung gewinnt man nicht durch Einbruch ins oberste Stockwerk. Man muss unten hineingehen dürfen, wenn man auf gegründete Weise höherkommen will. Nur wenn wir sehen, wie unser *Wissen* sich bildet, kann es uns bilden» (W, 1970). Als das Zentrum seiner Arbeit bezeichnete Martin Wagenschein in seiner letzten Rede (vom 18. Sept. 1985) folgendes: Der Mensch darf durch seine Beschäftigung mit der Naturwissenschaft nicht gespalten werden. Die Wagenscheinsche Naturphilosophie ist eine Geisteshaltung, «in der es die Spaltung nicht gibt – nicht geben muss – zwischen den beiden Arten, die Natur zu sehen, der gemüthaften und der physikalischen» (W, 1986). Das gelingt nur, wenn der Mensch sich nicht blindlings dem naturwissenschaftlichen Standpunkt unterwirft – etwa durch eine unkritische Lektüre von Weinbergs «Ersten drei Minuten» –, sondern das naturwissenschaftliche Vorgehen «im Sinne eines bruchlosen, heilen Angliederns an das ursprüngliche und uneingeschränkte Einvernehmen mit der Natur» (W, 1965) versteht. Die naturwissenschaftliche Welt wurzelt in der Lebenswelt – wo denn sonst? Und aus dieser Lebenswelt, am Beispiel eines Saitenklangs, möchte ich nun versuchen, dasjenige, was naturwissenschaftlich erkennbar ist an diesem Klang, herauszuschälen.

3 Das Urphänomen der Akustik

«Fragt uns ein Tauber: Was ist das, der Klang einer Saite? – so können wir ihm unmöglich mitteilen, was wir hören» (W, 1965, 1980). Wir streichen oder zupfen die Saite an, und der Klang kann sich uns mitteilen, weil unser Gehör seinem Wesen entspricht. «Das Grundwort Ich-Du stiftet die Welt der Beziehung», schreibt Martin Buber. Erst wenn wir den Klang analysieren wollen, wenn wir etwas über ihn wissen wollen, machen wir ihn zum Gegenstand möglicher Erfahrung. «Die Welt der Erfahrung gehört dem Grundwort Ich-Es zu» (Buber, 1977). Oder der Naturwissenschaftstheoretiker Theodor Litt: «Von Ursprung her weiss der Mensch nichts von der scharfen Trennung, durch die das erkennende Subjekt sich von der als Objekt zu erkennenden Welt scheidet. Er weiss nichts von dem schroffen Gegenüber des sich zum denkenden Selbst straffenden Ich und der durch die Macht seines Denkens zu bezwingenden äusseren Wirklichkeit» (Litt, 1959). Aber das allein genügt nicht für das ungeübte Ohr. Wir müssen als handelnde Subjekte eingreifen: «Es bedarf des Tuns, um zu begreifen» (W, 1962). Wir müssen die Saite stören, und dabei geht das, was wir mit Fug und Recht Klang nennen, verloren. Nur wenn wir genau in der Mitte sanft auf die Saite tippen, erklingt ein Ton, der um eine Oktave höher liegt als der Grundton. Der Forschergeist erwacht, und wir probieren an anderen Stellen: Im Saitendrittel angetippt, steigt der Ton auf die Duodezime (die Quint über der Oktave), im Viertel auf die Doppeloktave und im Fünftel auf die grosse Terz darüber. Wenn wir nun genau in den Klang der ungestörten Saite hineinhorchen, dann vernehmen wir alle diese Obertöne, die gleichzeitig mit dem Grundton erklingen – und noch viel mehr. Ein einziger Saitenklang enthält alle Töne in sich – mundus in gutta. Die Obertöne geben dem Klang je nach ihrer Stärke seine Farbe, sein Timbre. Eine Flöte klingt anders als ein Cello, schlichter: Der Flötenklang enthält weniger Obertöne als ein Saitenklang. Ebenso enthält der Vokal «u» weniger Obertöne als das schrille «i».

Es war möglicherweise beim Suchen nach weiteren Klängen auf dem Monochord, als die Pythagoreer einen Zusammenhang entdeckt haben, der wohl die Initiation der mathematischen Naturwissenschaft war. Der St. Galler Harmoniker, Puppenspieler und Physiker Rudolf Stössel nennt diesen Zusammenhang «das Urphänomen der Akustik»: «Zwei gleichartige, gleich gespannte Saiten erzeugen Töne in einem konsonanten Intervall, wenn sich ihre Längen wie zwei kleine ganze Zahlen verhalten» (Stössel, 1982, 1987).

In der folgenden Tabelle ist das akustische Urphänomen an einigen Beispielen dargestellt:

Intervall	Seitenlängenverhältnis
Prime	1:1
Oktave	1:2
Quinte	2:3
Quarte	3:4

grosse Terz	4:5
kleine Terz	5:6
Sekunde:	
grosser Ganzton	8:9
kleiner Ganzton	9:10

Die Zahl 7 fehlt in dieser Tabelle. Sie ist die kleinste natürliche Zahl, die im Verhältnis mit einer anderen kleinen natürlichen Zahl kein konsonantes Intervall bildet. Man nennt die 7 die «erste ekmelische Primzahl» – «ekmelisch» heisst: ausserhalb des «Melos» (Stössel, 1987).

Vergleichen wir die Intervalle mit den Obertönen – die Oktave als erster Oberton legt diesen Vergleich nahe –, so erkennen wir sofort folgende Entsprechungen: Die Quinte ist der um eine Oktave heruntergeholte 2. Oberton, und die grosse Terz ist der um zwei Oktaven heruntergeholte 4. Oberton. Bis zum fünften Oberton (das ist der sechste Teilton) stehen diese untereinander und zum Grundton in konsonanten Verhältnissen.

Da wir nun schon im Vorhof der Mathematik sind, setzen wir an einem Beispiel die Intervalle und die Längenverhältnisse ihrerseits in Relation:

Intervalle	Längenverhältnisse
Quinte + Quarte = Oktave	$(2:3) \cdot (3:4) = 1:2$
Quinte – Quarte = Sekunde	$(2:3) : (3:4) = 8:9$

Addieren oder subtrahieren wir die Intervalle, müssen wir die Längenverhältnisse multiplizieren oder dividieren: Zwischen den musikalischen Intervallen und den ihnen entsprechenden Saitenlängenverhältnissen besteht ein Zusammenhang, den die Mathematiker logarithmisch nennen. Weil die musikalischen Intervalle unser Gemüt ansprechen, ihre Hervorbringung unser Handeln erfordert und die Zahlenverhältnisse unseren Geist herausfordern, nenne ich diesen Zusammenhang den «menschlichen Logarithmus».

4 Der physikalische Aspekt eines Saitenklangs

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse führen nun aber keineswegs zwangsläufig zur physikalischen Analyse der Klänge. Mindestens drei Pfade zeigen sich, denen zu folgen in unserem Ermessen liegt:

1) Die Harmonielehre als Teil der Musiktheorie untersucht den Aufbau von Akkorden und deren Beziehungen untereinander. Sie hat es ausschliesslich mit der Intervallhälfte unserer Tabellen zu tun.

2) Nicht zu verwechseln mit der Harmonielehre ist die Harmonik. Die Harmoniker interessieren sich für die rechte Hälfte unserer Tabellen: Sie suhen einfache Zahlenverhältnisse in der Musik, der Geometrie, im Mineralihen und Organischen, in der Architektur und der bildenden Kunst. Über e Herkunft der Harmonik schreibt der Mathematiker van der Waerden:

«Die Pythagoreer lehrten, dass jeder Planet bei seiner Kreisbewegung einen Klang erzeugt, einen einzigen Ton, und dass diese Töne eine *Harmonie* bilden, d. h. eine wohlgeordnete, wohlklingende Tonleiter ... Für die älteren Pythagoreer ist die Himmelsmusik kein natürliches, sondern ein mystisches, göttliches Ereignis. Dass wir diese Musik nicht hören können, fanden sie ganz natürlich, aber dass Pythagoras sie ‹unmittelbar an der Quelle› zu hören vermag, das erschien ihnen wunderbar» (van der Waerden, 1979). Schon der Titel seines Hauptwerks «Harmonice Mundi» zeigt, dass Johannes Kepler in erster Linie ein Harmoniker war und erst dann – quasi nebenamtlich – ein Physiker.

3) Weder die Harmonielehre noch die Harmonik erheben den Anspruch, das Phänomen «Klang» zu begründen oder nach seinem Wesen zu befragen. Fragen wir nun den Physiker Martin Wagenschein: «Was ist also ein Klang in Wirklichkeit?» – «Die Antwort ist gefunden und kann leicht von jedem geprüft werden. Wenn ein Ding tönt, eine Geige zum Beispiel, so ist immer ein Teil an ihr zu finden, das sich schnell und regelmässig hin und her bewegt. Ein Ton entsteht also durch eine regelmässig schwingende Bewegung eines Körpers oder eines Teils an ihm. Und seine Ausbreitung ist das Fortlaufen der Luftstösse, die durch diese Bewegung erzeugt werden. Dies eben Beschriebene geschieht auch dann, wenn niemand es hört, wenn niemand dabei ist. Es ist also das allein Wirkliche am Schall. Was wir *hören* dagegen, ist nur eine Empfindung, die das Ohr uns vorzaubert, sobald es von diesen Luftstössen getroffen wird. Die *wirkliche* Welt, die Welt an sich, ist stumm» (W, 1965, 1980).

Sie staunen? Nun ja, an seiner Sprache erkennt man ihn. Aber sagt er da nicht dasselbe über den Klang wie Weinberg und Hawking über das Universum? Allerdings steht der Wagenschein-Text unter dem Untertitel «Irreführung». Denn wenige Seiten später finden wir ein Konzentrat dessen, was ich Wagenscheins naturphilosophischen Ansatz nennen möchte – exemplarisch, natürlich: «Dass die Saite der Geige tönt, ist nicht nur zu *hören*, es ist auch zu sehen und mit den Fingern zu tasten ... Das gilt für jeden Ton. Es ist – grundsätzlich – immer möglich, seine Schwingungen auch zu sehen und zu tasten.

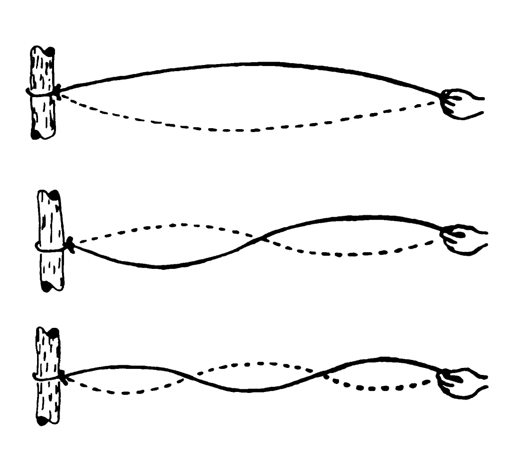
Der Taube kann *nur* sehen und tasten. Dadurch können wir ihm einen Hinweis darauf geben (nicht: was ein Ton *ist*, aber doch:), was zu einem Ton ‹dazugehört›. Seine Welt ist ärmer als die unsrige. In unserer vollständigen Welt ist ein jedes Ding zu tönen fähig, in seiner nicht, es kann nur zittern.

Trotzdem haben wir, wenn wir sagen: ‹Schall ist Bewegung›, nicht die sinnliche Welt verlassen und sind einer absoluten Welt nicht nähergekommen. Denn: ‹Erklären› ist ja immer nur ein ‹Inbeziehungsetzen zu anderem›, Bekannterem, Erwünschterem. Das ist hier: Tasten und Sehen. Aus der Welt der Sinne kommen wir aber dabei nicht heraus, weder in der Tat noch in der Vorstellung. Deshalb ist es falsch zu sagen, was der Schall ‹an sich› sei. Wir haben nur erkannt, was er für Auge und Hand ist!

Wenn wir sagen: ‹Schall ist Bewegung›, so klingt das zwar sehr absolut, sehr ‹abgelöst› von Auge und Hand und verführt deshalb zu Worten wie: ‹an

sich› und ‹Wirklichkeit›. Das darf aber nicht darüber wegtäuschen, dass der grundlegende Tatbestand auf Empfindungen des Auges und der Hand beruht, aus denen wir durch ein besonderes eingeborenes Vermögen die nur scheinbar freischwebenden Begriffe der Bewegung in Raum und Zeit bilden. Wenn wir also die Begriffe ‹es gibt›, ‹ist in Wirklichkeit›, ‹an sich› vermeiden, weil sie so leicht unscharf und verschwommen werden, so schälen wir aus den Sätzen: ‹Ton an sich ist Schwingung; die wirkliche Welt ist also stumm› als eigentlichen Gehalt heraus: Mit jeder Tonempfindung ist die Möglichkeit fest verbunden (ihr zugeordnet), eine Schwingung zu sehen oder zu tasten» (W, 1965, 1980).

Innerhalb des Begriffshorizonts der Physik können wir nun fragen: Wie kommt es, dass sich immer dieselbe Tonhöhe einstellt, wenn wir eine Saite irgendwo und irgendwie anklopfen, anzupfen oder mit dem Bogen kratzen? Das muss an der Saite selbst liegen: Aber nicht nur die Saitenlänge, sondern auch die Spannung und die Masse bestimmen die Tonhöhe. Klaviersaiten für Basstöne werden mit Kupferdraht umsponnen, um ihre Masse zu vergrössern. Um diese Zusammenhänge besser untersuchen zu können, betrachten wir die Schwingungsvorgänge in Zeitlupe. Wir interessieren uns nun überhaupt nicht mehr für den Klang – typisch Physiker! Wenn ich in den Bergen eine dieser einfachen Seilbahnen sehe, die von Alp zu Alp führen, kann ich der Versuchung, heftig auf das Seil zu klopfen, nicht widerstehen. Sogleich flieht der Buckel dem Seil entlang, als wäre der Teufel hinter ihm her. Nach einer Weile kommt er wieder zurück, aber so, als hätte jemand bei der anderen Station genau spiegelbildlich wie ich auf das Seil geklopft. Ein heftiger, kurzer Ruck – und schon saust er wieder davon, und zwar wieder auf der ursprünglichen Seite. Der Buckel saust also hin und her und wechselt bei jedem Umkehrpunkt den Ausschlag. Wäre das Seil unendlich lang, hätte er keinen Grund, zurückzukehren: Es ist die geometrische Begrenztheit, welche die Periodizität schafft. Die Ausbreitung des Buckels dagegen ist ein Spiel von Kraft und Trägheit. Wenn wir nämlich das Seil stärker spannen – wir können das an einem langen Gummischlauch zeigen –, läuft der Buckel schneller, er braucht weniger Zeit für sein Hin und Her, die Frequenz dieses periodischen Vorgangs wird höher.



Und vom Stimmen der Saiteninstrumente wissen wir: Je stärker wir eine Saite spannen, um so höher wird der Ton. Die physikalisch relevante Grösse für die onhöhe ist also die Frequenz, h. die Anzahl Schwingungen

eiteinheit. Der Gummischlauch kann aber auch nach anderen Mustern ngen als dem elementaren Hin und Her des Buckels. Die folgenden ıngungsformen können wir durch immer schnelleres Schütteln der , welche das eine Ende des Schlauches hält, anregen.

i doppelter und dreifacher Frequenz finden wir in der Mitte bzw. den ln des Schlauches Stellen, die nicht schwingen. Man nennt sie Schwinknoten. Durch das Antippen dieser Stellen an der Saite haben wir Oberıus dem Klang gelockt: die Oktave und die Duodezime.

enn wir sagen, wir können Seilwellen oder Saitenschwingungen auf und Trägheit zurückführen, so meinen wir mit diesen Begriffen keinesmagische Wesenheiten, welche die Natur regieren. Vielmehr erfanden i, Newton, Huygens usw. diese Begriffe und andere wie «Gravitation», egungsgrösse» usw. Damit schufen sie eine zweite abstrakte Natur, eine llnatur oder ein Naturmodell. Und erst in dieser abstrakten geistigen sind die gesetzmässigen Zusammenhänge zu erkennen: Nicht nur Saitengungen und Seilwellen, auch Wasser- und Schallwellen, aber auch die gung fallender oder geworfener Körper sowie der Lauf des Mondes und laneten sind als Spiel von Kraft und Trägheit zu verstehen. Diese abe Welt ist das mechanische Universum. Über diese Art von Naturvernis schrieb Werner Heisenberg: «Die Entdeckung, dass hier etwas Geames vorliegt, auf das man, unter Absehen von allen anderen tieferge- en Unterschieden, den Blick richten konnte, gehört zu den folgenschwer- reignissen in der Geschichte der Naturwissenschaft» (Heisenberg, 1971). e Physik zeigt aber stets auch, dass die Welt nie ganz so ist, wie sie der niker gerne hätte: Wenn nämlich die Saite bei der Schwingung ausgeist, so ist sie ihrer Elastizität wegen ein wenig stärker gespannt, als wenn ht. Wir können uns dazu den gewölbten Bauch der Grundschwingung llen. Und auf diesem stärker gespannten Bauch muss sich nun die ıngung, die dem ersten Oberton entspricht, entfalten. Ihre Frequenz wird lb ein wenig grösser sein als das Doppelte der Grundfrequenz. Der erste on erklingt also um eine Winzigkeit höher als die Oktave – und so geht en Obertönen. Aber vielleicht sind es gerade diese kleinen Abweichunon der Harmonizität, welche dem Klang seine «Wärme» geben (Black- 1988).

· physikalische Aspekt des Lichtes

n Wagenschein hat uns auch geholfen, Sätze wie «Wärme ist nichts als kularbewegung» und «Licht ist nichts als elektromagnetische Welle bengsweise Photonenschauer» geistig zu reinigen. Während ich mir bei em Physikstudium gar keine Gedanken über die Reduktion der Wärme ewegung gemacht habe, hat mich die mechanistische Deutung des Lichts nur ihrer Doppelnatur wegen irritiert: Wie soll man sich diese Lichtwel-

len vorstellen? Die Maxwellsche Mathematik sagt, dass der magnetische Feldvektor stets senkrecht zum elektrischen Feldvektor schwingt. Was ist das Wesen dieser Vektorpfeile, wie lang sind sie, und was ist ausserhalb? Aber solche Gedanken verwirren den Physikstudenten nicht lange: Die relativ komplizierte Mathematik der Wellenoptik narkotisiert philosophische Reflexionen. Erst Wagenscheins naturphilosophisches Prosagedicht «Das Licht und die Dinge» (W, 1965, 1980) weckte meinen Geist für das latent Gewusste, nämlich, dass man das Licht gar nicht sehen kann, dass es gar nicht «aussieht», dass es gar keiner mechanistischen Begründung bedarf! Damit sind wir bei Goethes Auffassung vom Licht: «Licht und Geist, jenes im Physischen, dieser im Sittlichen herrschend, sind die höchsten dankbaren unteilbaren Energien» (Goethe: Maximen und Reflexionen Nr. 1299). Fragen wir den Physiker Wagenschein nach dem Wesen des Lichts: «Das Licht ‹ist› weder Welle noch Geschosshagel. Wir dürfen nur sagen: Unter gewissen experimentellen Umständen zeigt sich das Licht unter dem Gleichnis oder, wie die Physiker sagen, dem ‹Bild› eines Wellenzuges; und unter anderen Umständen sind wir gezwungen, das Bild feiner fliegender Partikel zu wählen» (W, 1970). In der etwas akademischen Sprache von Niels Bohr tönt dieser Sachverhalt wie folgt: «Die Kontinuität der Lichtfortpflanzung in Zeit und Raum einerseits und der atomare Charakter der Lichtwirkungen andererseits müssen als komplementär aufgefasst werden, in dem Sinn, dass jede für sich wichtige Züge der Lichtphänomene zum Ausdruck bringt, die, selbst wenn sie vom Standpunkt der Mechanik aus unvereinbar sind, niemals in direkten Gegensatz kommen können, da eine eingehendere Analyse des einen oder anderen Zuges auf Grund mechanischer Vorstellungen verschiedene, sich gegenseitig ausschliessende Versuchsanordnungen erfordert» (Bohr, 1958). Der scheinbare Widerspruch des Welle-Teilchen-Dualismus löst sich in nichts auf, wenn wir das Licht und die Elementarteilchen, kurz, die Objekte und Phänomene der Quantenphysik nicht wie die Objekte und Phänomene der klassischen Physik als unabhängig voneinander existierende Wesen betrachten. Bohr schreibt dazu: «Für die objektive Beschreibung ist es angebracht, das Wort ‹Phänomen› nur in bezug auf Beobachtungen anzuwenden, die unter genau beschriebenen Umständen gewonnen wurden und die Beschreibung der ganzen Versuchsanordnung umfassen» (Bohr, 1958). Lichtwellen, Photonen, Atome, Elektronen, Quarks usw. gehören – in Wagenscheins Sprache – der zweiten Natur an. Sie gehören nicht zur Welt der Sterne und Wolken, der Häuser und Blumen. Physik ist «eine begriffliche Umkonstruktion der Wirklichkeit» (W, 1962).

In der Schule muss man aber keineswegs die Maxwellsche Theorie oder gar die Quantentheorie behandelt haben, um den ersten Schritt einer naturphilosophischen Betrachtung des Lichts zu tun. Um das zu zeigen, lese ich Ihnen eine Prüfungsarbeit in Physik vor, die an einem Zürcher Gymnasium verfasst wurde. Die Autorin war damals im achten Schuljahr und hatte erst einige Wochen Physik. Sie schreibt an ihre Schwester:

«Es gibt viele Dinge, die man nicht sieht, aber doch da sind. Zum Beispiel

in Spiegel. Siehst Du einen Spiegel? Du wirst jetzt sicher sagen: ‹Aber ja, na-
ürlich sehe ich einen Spiegel!› Aber siehst Du ihn wirklich? Man sieht nur,
ras er gerade reflektiert, er sieht immer anders aus, aber Du siehst nur, was er
eflektiert, den eigentlichen Spiegel siehst du nicht! Und wie ist das mit dem
icht, wie schaut Licht aus? Auch Licht siehst Du nicht! Seltsam, das Licht
eht man nicht, aber ohne Licht würde man nicht sehen! Alles reflektiert
icht, ausser schwarze Dinge. Diese absorbieren (verschlucken) das Licht.
um Beispiel ein weisser Pullover reflektiert das ganze Licht wieder, genau
ie der Spiegel, aber warum ist dann der Pullover nicht auch ein Spiegel und
er Spiegel weiss? Der Spiegel ist glatt und reflektiert somit alles im gleichen
Vinkel, wie es gekommen ist. Der Pullover ist rauh, man könnte ihn mit Tau-
enden von kleinen Spiegelchen vergleichen, die das Licht somit wieder in
lle Richtungen verstreuen, genau wie Schnee. Eine einzige Schneeflocke ist
in ‹Spiegel›, eine ganze Schneedecke sieht man aber weiss. Es ist schon
igenartig, was man so sieht und was man nicht sieht! Auch ein Loch ist so et-
as. Kannst Du mir sagen, wie ein Loch aussieht? Man sieht es eigentlich
uch nicht, es sieht im Dunkeln und im Licht gleich aus. Rote Dinge sehen im
oten Licht am hellsten aus, grüne Dinge im grünen Licht und blaue Dinge im
lauen Licht. Das Loch aber sieht immer gleich aus. Es kann gar nie heller
ein, auch im stärksten Licht nicht. Was meinst Du dazu?»

Die rätselhafte Ordnung des Kosmos

Das Bildende im Umgang mit Physik ist in erster Linie die Entdeckung, dass
ie Natur verstehbar ist: «Das ewig Unbegreifliche an der Natur ist ihre Be-
reiflichkeit», sagte Einstein (nach W, 1962). Martin Wagenschein hat den
lementarakt des Verstehens in einem hübschen Gleichnis beschrieben: «Ver-
tehen heisst: einen Fremden bei näherer Betrachtung als einen nur verkleide-
en alten Bekannten wiedererkennen» (W, 1970, 1980). Nach einem Kurs, an
em meine Wagenschein-Bücher den Teilnehmern zur Verfügung standen,
and ich die ersten beiden Silben des Wortes «wiedererkennen» unterstrichen
und dahinter mit Bleistift in griechischen Buchstaben «Anamnesis». Diese
emerkung hat mich sogleich an einen Text von Wolfgang Pauli erinnert, den
ch Ihnen nicht vorenthalten möchte: «Der Vorgang des Verstehens der Natur
owie auch die Beglückung, die der Mensch beim Verstehen, d. h. beim Be-
usstwerden einer neuen Erkenntnis empfindet, scheint demnach auf einer
ntsprechung, einem Zur-Deckung-Kommen von präexistenten inneren Bil-
lern der menschlichen Psyche mit äusseren Objekten und ihrem Verhalten zu
eruhen. Diese Auffassung der Naturerkenntnis geht bekanntlich auf Plato
urück und wird auch von Kepler in sehr klarer Weise vertreten. Dieser
pricht in der Tat von Ideen, die im Geist Gottes präexistent sind und die der
eele als dem Ebenbild Gottes mit-ein-erschaffen wurden. Diese Urbilder,
velche die Seele mit Hilfe eines angeborenen Instinktes wahrnehmen könne,

nennt Kepler *archetypisch*. Die Übereinstimmung mit den von C.G. Jung in die moderne Psychologie eingeführten ... *Archetypen* ist eine sehr weit gehende. Indem die moderne Psychologie den Nachweis erbringt, dass jedes Verstehen ein langwieriger Prozess ist, der lange vor der rationalen Formulierbarkeit des Bewusstseinsinhaltes durch Prozesse im Unbewussten eingeleitet wird, hat sie die Aufmerksamkeit wieder auf die vorbewusste, archaische Stufe der Erkenntnis gelenkt. Auf dieser Stufe sind an Stelle von klaren Begriffen Bilder mit starkem emotionalem Gehalt vorhanden, die nicht gedacht, sondern gleichsam malend geschaut werden» (Jung, Pauli, 1952; Pauli, 1961).

Nebenbei lässt uns der Pauli-Text die Bedeutung der oft geschmähten «animistischen» Sprechweise Wagenscheins, aber auch sein Interesse an «Kindern auf dem Wege zur Physik» (W, 1973) in einem neuen Licht sehen: Bilder von starkem emotionalem Gehalt gelten für einen der grössten Physiker *unseres* Jahrhunderts als Voraussetzung für das Verständnis der Natur. Ähnlich drückt sich Heisenberg aus: «Wer über die Philosophie Platos meditiert, weiss, dass die Welt durch Bilder bestimmt wird» (Heisenberg, 1969).

Der platonische Erkenntnisansatz führt auf einen Urgrund: Es gibt eine unserer Willkür entzogene Ordnung des Kosmos, der «sowohl die Seele des Erkennenden als auch das in der Wahrnehmung Erkannte ... unterworfen sind» (Jung, Pauli, 1952). «Diesen Einheitsaspekt des Seins hat C. G. Jung mit dem Terminus Unus Mundus bezeichnet ... Und Jung vermutete, dass der Archetypus der natürlichen Zahlen mit dem Unus Mundus speziell verbunden sein könnte» (von Franz, 1970). Von dieser geheimnisvollen Ordnung spricht auch Wagenschein (W, 1970, 1980): «Im bildenden Umgang mit der Natur erfahren wir zwei Autoritäten:

1) in uns selbst die Autorität der mathematischen Logik,

2) ausser uns die Tatsache, ‹dass die Mathematik auf die Dinge unserer Erfahrung passt› (Heisenberg, 1955). Dazu kommt

3) die rätselhafte Einigkeit beider Autoritäten.» Wagenschein fragt sich: «Was könnten wir denn machen, wenn die Natur nicht geruhte, darauf einzugehen, dass wir mathematisch fragen?

4) Als Gesamtergebnis: Die physikalisch betrachtete Natur enthüllt eine *Ordnung*. Sie gibt einen Beitrag zum Wichtigsten, was wir zum Leben brauchen: zum Vertrauen und Selbstvertrauen.»

Literatur

iels Bohr: Atomphysik und menschliche Erkenntnis I, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1958.
Donnell Blackham: Klaviere, in «Die Physik der Musikinstrumente», Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1988.
artin Buber: Ich und Du, Verlag Lambert Schneider, Heidelberg, 1977.
arie-Louise von Franz: Zahl und Zeit; Psychologische Überlegungen zu einer Annäherung von Tiefenpsychologie und Physik, Klett Verlag, Stuttgart, 1970.
ephen Hawking: Eine kurze Geschichte der Zeit; Die Suche nach der Urkraft des Universums, Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, 1988.
erner Heisenberg: Das Naturbild der heutigen Physik, Rowohlts deutsche Enzyklopädie, Bd. 8, 1955.
erner Heisenberg: Der Teil und das Ganze; Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper Verlag, München, 1969.
erner Heisenberg: Schritte über Grenzen; Gesammelte Reden und Aufsätze, Piper Verlag, München, 1971.
alter Heitler: Naturphilosophische Streifzüge, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1970.
erhard Huber: Philosophische Fragen zum Darwinismus, Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 126/1: 3–17, 1981.
ırl Gustav Jung und Wolfgang Pauli: Naturerklärung und Psyche, Rascher Verlag, Zürich, 1952.
ıeodor Litt: Naturwissenschaft und Menschenbildung, Quelle und Meyer Verlag, Heidelberg, 1959.
olfgang Pauli: Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1961.
dolf Portmann: Neue Wege der Biologie, Sammlung Piper, München, 1960.
dolf Portmann: Probleme des Lebens; Eine Einführung in die Biologie, Verlag Friedrich Reinhardt, Basel, 1964.
ans Primas: Biologie ist mehr als Molekularbiologie, Beitrag zur Vortragsreihe «Was ist Leben?» Zum 100. Geburtstag von Erwin Schrödinger im Rahmen des Studium Generale der Universität Konstanz, Wintersemester 1987/88.
udolf Stössel: Harmonikale Faszination, Schriften zur Harmonik Nr. 7, herausgegeben vom «Kreis der Freunde um Hans Kayser», Bern, 1982.
udolf Stössel: Wege zur Harmonik, Schriften zur Harmonik Nr. 15, herausgegeben vom «Kreis der Freunde um Hans Kayser», Bern, 1987.
L. van der Waerden: Die Pythagoreer, Artemis Verlag, Zürich, 1979.
artin Wagenschein: Die pädagogische Dimension der Physik, Westermann Verlag, Braunschweig, 1962.
lartin Wagenschein: Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken I, Klett Verlag, Stuttgart, 1965.
lartin Wagenschein: Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken II, Klett Verlag, Stuttgart, 1970.
lartin Wagenschein: Verstehen lehren, Beltz Verlag, Weinheim und Basel, 1968; ergänzte Auflage 1989.
lartin Wagenschein, Agnes Banholzer, Siegfried Thiel: Kinder auf dem Wege zur Physik, Klett Verlag, Stuttgart, 1973.
lartin Wagenschein: Naturphänomene sehen und verstehen, herausgegeben von Hans Christoph Berg, Klett Verlag, Stuttgart, 1980.
lartin Wagenschein: Die Sprache zwischen Natur und Naturwissenschaft, Jonas Verlag, Marburg, 1986.
teven Weinberg: Die ersten drei Minuten; Der Ursprung des Universums, Piper Verlag, München, 1977.

r. Peter Stettler, im Stedtli, CH-8627 Grüningen.

Aus alten Jahrgängen

Die Bäder von Saxon

An die zürcherische Jugend auf das Jahr 1854. Von der Naturforschenden Gesellschaft. LVI. Stück.

Unter den vielen Naturmerkwürdigkeiten der Schweiz gewähren auch die mannigfaltigen Erscheinungen, welche die Quellen darbieten, ein vielseitiges Interesse. Wir haben deshalb in den vorliegenden Blättern versucht, das Wichtigste was bis jetzt darüber bekannt geworden ist, in gedrängter Kürze zusammen zu fassen. Dabei schien es uns nicht unzweckmässig, einige einleitende Bemerkungen über die Quellen im Allgemeinen vorauszuschicken.

Entstehung der Quellen

Die Quellen verdanken im Allgemeinen ihre Entstehung den wässerigen atmosphärischen oder meteorischen Niederschlägen, d.h. den in der Luft aufgelösten und an der Oberfläche der Erde, besonders an den Spitzen und Abdachungen hoher Gebirge sich verdichtenden Wasserdünsten, dem Nebel, Thau, Regen, Reif, Hagel, Schnee usw.
Ein grosser Theil dieses Wassers verdunstet zwar wieder an der Oberfläche der Erde, ein anderer wird von den Wurzeln der Pflanzen aufgesogen, aber der grössere Theil fliesst entweder sogleich nach den tiefer gelegenen Stellen ab, oder dringt in die Erde ein, und sickert zwischen den Spalten oder Klüften des Gesteins in's Innere der Gebirge oder der Ebene.

/ierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/1*: 63–69

)zon in der Schweiz

ie Ozonbelastung ist zweifellos eines der gravierendsten Probleme in Hinsicht auf die Luft-Quali-t. Die Naturforschende Gesellschaft in Zürich macht in ihrer Vierteljahrsschrift durch die Autor-haft von Prof. Dr. H.U. Dütsch seit 1962 regelmässig darauf aufmerksam, zuletzt im Heft 1989/2. liegt deshalb nahe, dass der 271 Seiten umfassende Bericht «Ozon in der Schweiz» der Eidgenös-chen Kommission für Lufthygiene (EKL), herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und ndschaft als Nr. 101 der Schriftenreihe Umweltschutz (zu beziehen beim Dokumentationsdienst BUWAL, 3003 Bern), hier angemessen gewürdigt wird. Ich danke Prof. Dr. H.U. Wanner, Präsi-t der EKL, dass er Hand geboten hat, die Zusammenfassung und zwei repräsentative Bilder in ere Rubrik «Streiflichter aus der Wissenschaft und Forschung» aufnehmen zu dürfen.

Der Redaktor.

...ng, Verfrachtung und Abbau von Ozon

...nd weitere Photooxidantien werden in bodennahen Luftschichten und in der freien Tro-...re durch photochemische Reaktionen aus Vorläuferschadstoffen gebildet. Von Bedeutung ...bei Stickoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen (VOC = volatile organic com-...s), Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4). Die flüchtigen organischen Verbindungen ...) wurden früher in der Lufthygiene vereinfachend als Kohlenwasserstoffe (HC) bezeichnet. ...sich beim Ozon und den Photooxidantien um sekundäre Luftschadstoffe handelt, die wäh-...es Transports verschmutzter Luftmassen entstehen, treten die höchsten Ozonbelastungen in ...gel nicht in den Quellregionen der Primärschadstoffe (Ballungsräume) auf, sondern in de-...eren Umgebung und in ländlichen Gebieten.

...s Auftreten hoher Ozonkonzentrationen in Luftmassen, die sich über Ballungsräume oder ...ndustrialisierte Regionen hinwegbewegen, ist weitgehend von den meteorologischen Bedin-...n abhängig. Die Entstehung hoher Ozonkonzentrationen aus Vorläuferschadstoffen wird ...stigt durch hohe Lufttemperatur, starke Einstrahlung, lange Sonnenscheindauer, niedrige ...uchtigkeit und geringe Windgeschwindigkeit. Solche Bedingungen treten während ausge-...ten Hochdruckwetterlagen im Sommer auf. Die Ozonbelastung weist dann in bodennahen ...ftschichten einen ausgeprägten Tagesgang mit üblicherweise höchsten Konzentrationen im ...rlauf des Nachmittags auf. In höheren Luftschichten sind die Tagesgänge in der Regel wegen ...lender nächtlicher Abbaureaktionen weniger ausgeprägt.

Ergebnisse von Messflügen weisen darauf hin, dass während Hochdruckwetterlagen grösser-...ımig erhöhte Ozonbelastungen auftreten. Diesen erhöhten Grundbelastungen überlagern sich ...hr oder weniger starke lokale bis regionale Beiträge.

Verschiedene ermittelte Ozon-Vertikalprofile zeigen deutlich, dass die höchsten Ozon-Spit-...nbelastungen, aber auch die höchsten mittleren Belastungen in der Regel nicht an den Boden-...ssstationen in offenem Gelände oder im Talgrund auftreten, sondern in höheren Luftschichten ...erhalb der planetaren Grenzschicht. Von Bedeutung ist dies nicht zuletzt für die Vegetation in ...nglagen, die aufgrund dieser Ozon-Vertikalverteilung einer höheren Gesamtdosis ausgesetzt .

Neben dem erwähnten Tagesgang zeigen die Ozonkonzentrationen in bodennahen Luft-...hichten der stark besiedelten und industrialisierten Länder der nördlichen Hemisphäre als Fol-der strahlungs- und temperaturabhängigen photochemischen Ozonproduktion einen deutli-...en Jahresgang mit einem breiten Sommermaximum vom Frühling bis zum Herbst. Dagegen ...rden sogenannte natürliche Jahresgänge mit einem Frühlingsmaximum und einem Herbstmini-...um heute nur noch an Stationen mit ausgeprägtem Reinluftcharakter beobachtet, wie sie in Eu-...pa nicht mehr anzutreffen sind. An solchen, sehr weit von anthropogen beeinflussten Gebieten ...tfernt liegenden Reinluftstationen werden die Ozon-Immissionen überwiegend durch Aus-...schprozesse zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre bestimmt.

Die Ozonkonzentration in bodennahen Luftschichten ist immer das Ergebnis von Bildungs-...d Abbauprozessen. Neben dem chemischen Abbau in der Atmosphäre (Reaktion mit Primär-

schadstoffen, z.B. mit Stickoxiden) spielt die trockene Deposition auf die Erdoberfläche eine wesentliche Rolle als Abbaumechanismus.

2 Natürliche und anthropogene Ozonbelastungen

Ergebnisse von Ozonmessungen im vorigen und anfangs dieses Jahrhunderts, statistische Analysen historischer Trends der Ozonkonzentrationen, neuere Ozon-Messungen an Standorten mit geringem anthropogenem Einfluss, Bilanzierungen der Ozonflüsse sowie Berechnungen mit photochemischen Modellen der Troposphäre weisen allesamt deutlich darauf hin, dass die Ozonkonzentrationen in der vorindustriellen Zeit wesentlich tiefer waren als heute Konzentrationszunahmen von 1–2% pro Jahr über längere Zeiträume werden dabei nicht nur in bodennahen Luftschichten, sondern auch in der freien Troposphäre beobachtet. Die mittleren Ozonbelastungen haben sich gemäss diesen Betrachtungen seit dem letzten Jahrhundert an ländlichen Messstationen stark besiedelter und industrialisierter Länder der nördlichen Hemisphäre verdoppelt bis verdreifacht. Während Photosmogepisoden können maximale 1h-Mittelwerte auftreten, die mehr als 5mal über den natürlichen Spitzenbelastungen liegen. Natürlicherweise dürften an ländlich gelegenen bodennahen Messstationen (< 1000 m ü.M.) der nördlichen Hemisphäre mittlere Ozonbelastungen (Jahresmittelwerte, Monatsmittelwerte) im Bereich von 20–40 µg O_3/m^3 und maximale 1h-Mittelwerte im Bereich von 60–80 µg O_3/m^3 zu erwarten sein.

Bisher durchgeführte Berechnungen mit photochemischen Modellen der Troposphäre zur Abklärung der Frage nach der natürlichen Belastung mit Ozon haben ebenfalls zu Ergebnissen geführt, die in der Grössenordnung der mittels historischer Ozondaten sowie Trendanalysen abgeleiteten natürlichen Ozonkonzentrationen liegen. Auch Ozonbilanzierungen unter Berücksichtigung des Transports aus der Stratosphäre in die Troposphäre sowie der dort ablaufenden Abbauprozesse und der resultierenden Deposition auf Oberflächen haben gezeigt, dass die heutigen hohen Ozonbelastungen in der planetaren Grenzschicht und in der freien Troposphäre nur aufgrund anthropogener Einflüsse erklärt werden können. Die anthropogene photochemische Ozonproduktion ist während Smogperioden im Sommerhalbjahr nach diesen Berechnungen wesentlich grösser als der Eintrag aus der Stratosphäre. Zumindest für die nördliche Hemisphäre bedeutet dies, dass heute ein deutlicher Nettofluss von Ozon aus der planetaren Grenzschicht in die freie Troposphäre stattfindet.

3 Ozonbelastungen in der Schweiz

Wie in andern Ländern Europas werden heute auch in der Schweiz wesentlich höhere Ozonkonzentrationen gemessen als dies natürlicherweise der Fall wäre. An den Messstationen des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe NABEL wurden bisher insbesondere in Jahren mit günstigen meteorologischen Bedingungen für die Photooxidantienbildung Jahresmittelwerte bis zu 70 µg/m³, Monatsmittelwerte bis zu 110 µg/m³, maximale Tagesmittelwerte bis fast 200 µg/m³, 8h-Mittelwerte von mehr als 200 µg/m³ (maximale Arbeitsplatzkonzentration, MAK-Wert) und maximale 1h-Mittelwerte gegen 400 µg/m³ beobachtet. Die Ozon-Spitzenkonzentrationen traten dabei während ausgeprägter Episoden im Sommerhalbjahr auf. Die Episoden bildeten sich im wesentlichen landesweit aus und wurden mehr oder weniger gleichzeitig an allen Messstationen festgestellt, allerdings in unterschiedlicher Stärke. Die höchsten Konzentrationen traten dabei im schweizerischen Mittelland auf, während in den Voralpen und Alpen gegenüber dem Mittelland eine höhere mittlere Belastung übers Jahr und die Vegetationsperiode festgestellt wurde (vgl. Bild 1).

Die Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV), aber auch die nicht wesentlich davon abweichenden Luftqualitätsrichtlinien internationaler Fachorganisationen wie der Weltgesundheitsorganisation (WHO), des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) sowie der ECE-Expertengruppen «Wirkungen von Luftschadstoffen» wurden jeweils im Sommerhalbjahr häufig und teilweise erheblich überschritten.

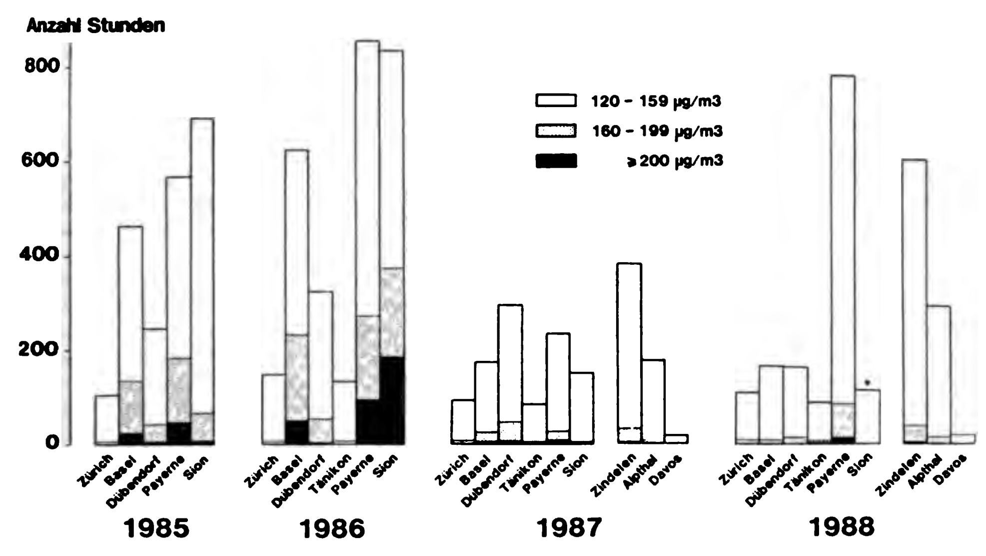


Bild 1 Anzahl Stundenmittelwerte über 120, 160 und 200 µg O_3/m^3 an den NABEL-Messstationen Zürich, Basel, Dübendorf, Tänikon, Payerne, Sion sowie an den NFP 14+-Waldstationen Zindelen, Alpthal und Davos für die Monate April bis September der Jahre 1985 bis 1988
*: unvollständige Messreihe

Seit 1985 werden im Rahmen des OXIDATE-Projektes der OECD an 34 ländlichen europäischen Messstationen nördlich der Alpen Ozondaten erhoben. Die in der Schweiz in den Jahren 1985 und 1986 aufgetretenen Ozonspitzenbelastungen gehören zu den höchsten innerhalb des untersuchten Raumes. Von Nordwesten nach Südosten, gegen den Alpenraum hin, war ein deutlicher Anstieg der Ozonkonzentrationen festzustellen. Dieser Gradient dürfte teilweise dadurch zu erklären sein, dass Topographie und Strahlungsbedingungen im Alpenraum die photochemische Umwandlung der Primärschadstoffe begünstigen (vgl. 2).

4 Wirkungen von Ozon

Hohe Oxidantienkonzentrationen verursachen nicht nur Schäden an Pflanzen und bestimmten Materialien, sondern gefährden auch die Gesundheit von Mensch und Tier.

Erste Beobachtungen über Auswirkungen von Ozon und andern Photooxidantien auf die Vegetation stammen aus den 40er Jahren, als in der näheren und weiteren Umgebung von Los Angeles charakteristische Schäden an Kulturen als Oxidantienschäden erkannt wurden. Mittlerweile wird Ozon nicht nur in den Vereinigten Staaten als wichtigster pflanzentoxischer Luftschadstoff betrachtet, sondern aufgrund der weltweit zunehmenden Konzentrationen auch in Europa als bedeutender Luftschadstoff beurteilt.

Pflanzen reagieren besonders empfindlich auf Ozon und Oxidantien. In Abhängigkeit der Konzentration, der Expositionsdauer, des Expositionsregimes, des Resistenzgrades der Pflanze und der durch Klima, Boden sowie biotische Interferenzen gegebenen Umwelt kommt es an Einzelpflanzen zu latenten, chronischen oder akuten Schädigungen.

Bei den akuten und chronischen Schadwirkungen handelt es sich um sichtbare Symptome in Form von Nekrosen vornehmlich nach kurzer Einwirkung hoher Konzentrationen, oder Chlorosen vornehmlich nach längerer Einwirkung niedriger Konzentrationen. Die latenten Schädigungen sind als äusserlich nicht feststellbare, unsichtbare Wirkungen im physiologischen und bioche-

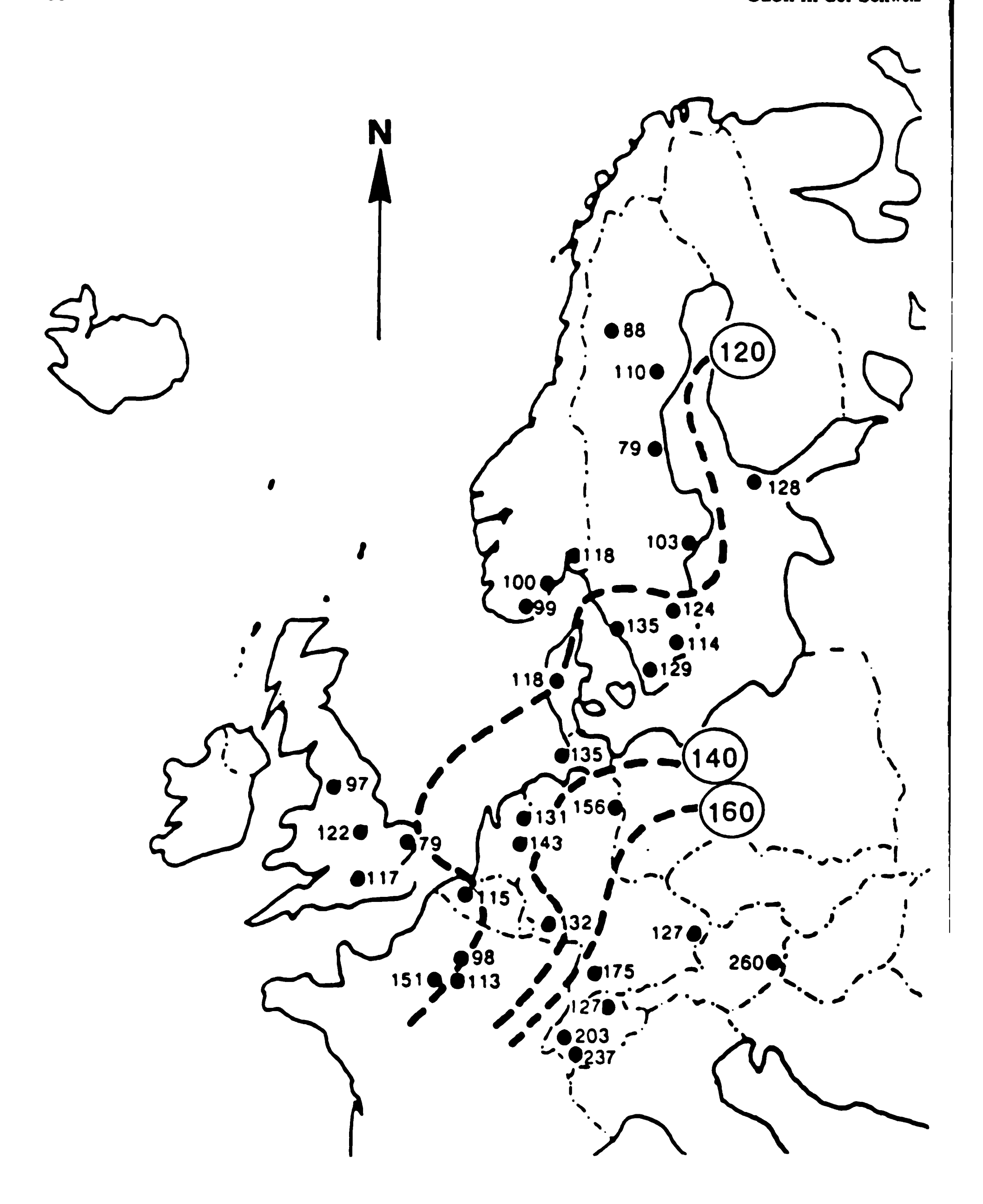


Bild 2 98 -Werte aller Ozon-Stundenmittelwerte in µg/m³ von April–September 1986 an den Messstationen des OXIDATE-Projekts der OECD sowie geschätzte Konzentrations-Isoplethen.

mischen Bereich definiert, die mit Wachstums- und Ertragsminderungen, gestörten Symbiosen, veränderter Anfälligkeit gegenüber pilzlichen Krankheitserregern und tierischen Schädlingen, verminderter Resistenz gegenüber Trockenheit und Frost oder einer vorzeitigen Seneszenz verbunden sein können.

Setzt man die in den vergangenen Jahren in der Schweiz gemessenen Ozonkonzentrationen in eine aus einer Vielzahl von experimentellen Befunden hervorgegangene Ozon-Dosis-Wirkungskurve allein nur für die im allgemeinen eher als resistenter geltenden Forstgehölze ein, so lässt sich erkennen, dass in der Schweiz heute Ozonkonzentrationen erreicht werden, die als phytowirksam, zumindest im Sinne latenter Schädigungen, bezeichnet werden müssen.

Bei den landwirtschaftlichen Kulturpflanzen stehen vor allem durch Direktwirkung von Luftschadstoffen, das heisst über die oberirdischen Pflanzenorgane verursachte Ertragseinbussen und Qualitätsveränderungen im Vordergrund. Die luftschadstoffbedingten Ertragausfälle dürften in der Schweiz je nach Kultur, Region und Jahr in der Grössenordnung zwischen 5 und 15% liegen. Ozon wird diesbezüglich als der bedeutendste Luftschadstoff angesehen.

Bei Menschen und Tieren wirkt Ozon als typisches Reizgas. Wegen seiner geringen Wasserlöslichkeit dringt Ozon weit in die Peripherie der Lungen ein. Infolge der stark oxidierenden Eigenschaften kann die Einwirkung von Ozon zu Schädigungen in den Alveolen und Bronchiolen führen. Beim Labortier wurden in Abhängigkeit von der Konzentration und der Expositionsdauer biochemische Veränderungen, morphologische Veränderungen (Alveolarepithel, Flimmerepithel), Auslösung entzündlicher Prozesse, Schädigungen der für die Abwehr wichtigen Makrophagen, eine Beeinträchtigung der Infektionsresistenz sowie Funktionsstörungen der Lungen beobachtet. Letztere sind auch beim Menschen nachgewiesen worden, ebenso biochemische und morphologische Veränderungen, Entzündungsprozesse, Schleimhautreizeffekte und Geruchsbelästigung. Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen weisen darauf hin, dass das Gesamtoxidantiengemisch des Photosmog aggressiver ist als Ozon allein. Gut dokumentiert ist die Herabsetzung der physischen Leistungsfähigkeit durch Photooxidantien. Bei den genannten Reaktionen wurden im allgemeinen beträchtliche Unterschiede zwischen den einzelnen untersuchten Personen beobachtet. Nicht nur Patienten mit chronischen Lungenkrankheiten, sondern auch Gesunde (Erwachsene und Kinder) können gegenüber Ozon empfindlich reagieren, insbesondere bei grossen körperlichen Anstrengungen.

Sowohl bezüglich der Auswirkungen auf die Vegetation als auch auf Menschen und Tiere handelt es sich beim Ozon um einen Luftschadstoff, bei welchem die Spanne zwischen der natürlichen Hintergrundbelastung und Konzentrationen, ab welchen unerwünschte Wirkungen auftreten, relativ gering ist. Es besteht deshalb praktisch kein Spielraum für den Einbau eines Sicherheitsfaktors.

Ozon gehört ebenso wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zu den klimaaktiven Spurengasen. Angesichts der erheblichen Zunahme der Ozonkonzentrationen in der Troposphäre seit Ende des letzten Jahrhunderts (ca. 1–2% pro Jahr) und des weiterhin zunehmenden Trends ist ohne Gegenmassnahmen zu erwarten, dass troposphärisches Ozon im 21. Jahrhundert eines der wichtigeren klimaaktiven Spurengase (Treibhauseffekt) darstellen wird.

5 Möglichkeiten zur Verminderung der Ozonbelastung

Die hohen Ozon-Konzentrationen im Sommerhalbjahr innerhalb der planetaren Grenzschicht in den stark besiedelten und industrialisierten Gegenden der nördlichen Hemisphäre sowie die ungebrochene Zunahme der Ozonkonzentrationen in der freien Troposphäre verlangen nach einem geeigneten Vorgehen zur Reduktion der Photooxidantienbelastung.

Aufgrund der bekannten Mechanismen der Photooxidantienbildung steht dabei die Reduktion der anthropogenen Emissionen von Stickoxiden (NO_x), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, z.B. Benzin, Lösemittel), Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4) im Vordergrund. Dabei stellt sich die Frage, auf welche Art und in welchem Ausmass die Emissionen der Vorläuferschadstoffe zu reduzieren sind, um eine möglichst wirksame Oxidantienverminderung zu errei-

chen. Dass diese Frage nicht einfach zu beantworten ist, zeigen die bisher vorliegenden Ergebnisse von Berechnungen mit Photooxidantienmodellen, die je nach Ansatz die komplexen Vorgänge der Bildung, des Transports und des Abbaus von Oxidantien im lokalen, regionalen und überregionalgrossräumigen Bereich innerhalb der planetaren Grenzschicht beschreiben und neuerdings auch die photochemischen Vorgänge in der freien Troposphäre miteinzubeziehen versuchen. Trotz der zahlreichen noch bestehenden Unsicherheiten in den Modellberechnungen kann festgestellt werden, dass aufgrund einer grossräumigen Betrachtungsweise (auch unter Einbezug der freien Troposphäre) die Emissionen aller Vorläuferschadstoffe (NO_x, VOC, CO, CH_4) vermindert werden müssen. Insbesondere sind erhebliche Emissionsreduktionen bei den Vorläuferschadstoffen NO_x und VOC in der Grössenordnung von 70–80% erforderlich (bezogen auf die Emissionsmengen der ersten Hälfte der 80er Jahre), um die Ozonbelastung grösserräumig auf das Niveau heutiger Luftqualitätsrichtlinien (z.B. WHO) vermindern zu können.

Ähnliche Schlussfolgerungen ergeben sich bei der Gegenüberstellung der historischen Entwicklung der Ozonkonzentrationen und jener der Emissionen der Vorläuferschadstoffe NO_x und VOC. In der Schweiz wurden im Jahre 1984 insgesamt rund 7mal mehr NO_x und 4mal mehr VOC emittiert als in den 50er Jahren. Aufgrund der historischen Ozondaten waren damals gegenüber heute eine etwa halb so grosse mittlere Ozonbelastung und ebenfalls deutlich geringere Spitzenbelastungen zu verzeichnen. Diese waren allerdings im Vergleich zu den vorhandenen Daten aus dem letzten Jahrhundert auch schon anthropogen erhöht und entsprachen demnach bereits nicht mehr den natürlicherweise zu erwartenden Belastungen. Eine Verminderung der Ozonkonzentrationen auf eine für den Menschen und die Umwelt erträgliche Belastung kann demzufolge auch aus dieser Sicht nur über die bereits erwähnte erhebliche Reduktion der Emissionen der Vorläuferschadstoffe erreicht werden.

Der Bundesrat hat im Luftreinhalte-Konzept vom 10. September 1986 seine lufthygienischen Ziele festgelegt. Die Schwefeldioxid-Emissionen sollen danach gesamtschweizerisch bis 1995 auf den Stand von 1950 vermindert werden, die Stickoxid- und Kohlenwasserstoff-Emissionen mindestens auf den Stand von 1960. Bei den Stickoxiden (NO_x) bedeutet dies gegenüber dem Jahre 1984 eine Reduktion um rund 66%, bei den Kohlenwasserstoffen bzw. flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) um 56%. Angesichts des erwähnten hohen Reduktionsbedarfs ist offensichtlich, dass die im Luftreinhalte-Konzept des Bundesrates festgelegten Ziele zur Verminderung der NO_x- und VOC-Emissionen in der Tat Minimalziele darstellen, an denen im Hinblick auf die dringend notwendige Lösung des Oxidantienproblems auf jeden Fall festgehalten werden muss.

Es ist klar, dass diese Ziele angesichts des hohen Reduktionsbedarfs bei den Emissionen der Vorläuferschadstoffe nicht kurzfristig, sondern nur mittelfristig erreicht werden können. *Eine zweckmässige Strategie zur Bekämpfung des Oxidantienproblems und insbesondere zur Verminderung der aus heutiger Sicht bedeutsamen chronischen Belastung besteht deshalb nicht aus vorübergehenden Sofortmassnahmen, sondern in erster Linie aus mittelfristigen, aber dauerhaft wirksamen Massnahmen zur Reduktion der Schadstoff-Emissionen.* Vorübergehende Sofortmassnahmen würden die für die Durchführung mittelfristiger Massnahmen (Massnahmenpläne der Kantone) dringend benötigten Kräfte absorbieren. Sie hätten zudem den Nachteil, dass sie in der Regel erst bei sehr hohen Belastungen ausgelöst werden, die beim Ozon oft erst gegen das Ende ausgeprägter Sommersmog-Episoden auftreten. Solche Sofortmassnahmen sind daher bezüglich der Beeinflussung der während einer Episode aufgetretenen Gesamtbelastung (integrale Dosis) eher von geringem Wert und deshalb fragwürdig.

Bei der Lösung des Oxidantienproblems kommt also dem *Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung* sowie dem *Erreichen der Ziele des bundesrätlichen Luftreinhalte-Konzepts* eine herausragende Bedeutung zu. Die Kräfte sind vorrangig darauf zu konzentrieren.

Notwendig ist dazu in erster Linie eine enge und konstruktive Zusammenarbeit zwischen Bund, Kantonen, Städten und Gemeinden. Das Minimal-Ziel «Stand 1960» kann bis 1995 offensichtlich nur dann erreicht werden, wenn es nicht nur auf Bundesebene, sondern auch auf Kantons-, Stadt- und Gemeindeebene zum erklärten Ziel der Luftreinhaltepolitik wird.

Das Schwergewicht ist dabei auf Massnahmen in den Siedlungsgebieten, bei industriellen und gewerblichen VOC-Emittenten und beim motorisierten Strassenverkehr zu legen. Ein Vergleich der mittleren flächenbezogenen Emissionen für das Jahr 1984 hat nämlich gezeigt, dass sie im schwei-

zerischen Siedlungsgebiet je nach Luftschadstoff rund 20- bis 350mal grösser sind als diejenigen n nicht besiedelten, vegetationsbedeckten Gebieten. Die flächenbezogenen Emissionen spielen nsofern eine wichtige Rolle, als sie für die Entstehung der lokalen Schadstoff-Konzentrationen und damit für die Reaktivität der Atmosphäre im Hinblick auf die Bildung sekundärer Schadstoffe wie Ozon von entscheidender Bedeutung sind.

Die Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG hat in ihrem kürzlich veröffentlichten 2. Teilbericht «Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Luftreinhalte-Konzept des Bundesrates und zusätzlichen Massnahmen zur Reduktion der Luftverschmutzung» aufgezeigt, dass es noch erheblicher Anstrengungen seitens des Bundes und der Kantone bedarf, um die im Luftreinhalte-Konzept festgelegten Ziele zu erreichen, dass das Erreichen derselben aber durchaus im Bereich des Möglichen liegt. Eine Voraussetzung ist jedoch, dass alle im Luftreinhalte-Konzept selbst vorgeschlagenen Massnahmen sowie alle von der Elektrowatt in ihrem 2. Teilbericht geprüften zusätzlichen Bundesmassnahmen und die im Rahmen der kantonalen Massnahmenpläne nach Luftreinhalte-Verordnung vorgesehenen kantonalen Massnahmen vollumfänglich realisiert werden. Im weiteren ist gemäss Bericht der Elektrowatt schon jetzt erkennbar, dass die bei den NO_x und den VOC auch dann noch bestehende Lücke zwischen der erreichten Emissionsverminderung und den Zielen durch weitere zusätzliche Massnahmen geschlossen werden muss.

Deutlich geht aus den bisherigen Untersuchungen hervor, dass nicht eine einzelne und spektakuläre Massnahme zum Ziele führt, sondern dass nur eine Vielzahl von Einzelmassnahmen schliesslich die erforderliche Gesamtreduktion der Emissionen erbringen kann. Bei politischen Entscheiden im Zusammenhang mit Einzelmassnahmen ist diesem Umstand in Zukunft vermehrt Rechnung zu tragen.

Der Erfolg der emissionsmindernden Massnahmen ist einerseits durch regelmässige Emissionsbilanzierungen, andererseits durch Immissionsmessungen zu kontrollieren.

Wegen der hohen Quellendichte sowie der klimatisch und topographisch günstigen Voraussetzungen für die Bildung von Photooxidantien (Becken- und Tallagen, häufig geringe Windgeschwindigkeiten) treten in der Schweiz Ozonkonzentrationen auf, die gemäss den bisher vorliegenden Daten im internationalen Vergleich unter den europäischen Ländern nördlich der Alpen zu den höchsten gehörten. Es ist deshalb zu erwarten, dass nationale Anstrengungen zur Verminderung der Primärschadstoffemissionen eine spürbare Entlastung insbesondere bei den Ozon-Spitzenbelastungen bewirken werden, auch wenn die Emissionen der Vorläuferschadstoffe nicht im gesamten europäischen Raum im gleichen Mass reduziert werden.

Neben den nationalen Bemühungen zur Verbesserung der Luftqualität sind aber auch bedeutende *internationale Anstrengungen* erforderlich, um das Oxidantienproblem grösserräumig lösen zu können und insbesondere die Grundbelastung zu verringern. Die Schweiz hat das im Rahmen der ECE/UNO ausgearbeitete Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung im Jahre 1983 ratifiziert. Die bisherigen Anstrengungen im Rahmen dieses Übereinkommens betrafen vor allem den Ausstoss von Schwefeldioxid. Ein Protokoll zur Einfrierung der Stickoxidemissionen bis 1995 und zur quantitativ noch nich spezifizierten Verminderung ab 1996 wurde im November 1988 von 35 Ländern unterzeichnet. In einer zusätzlichen Deklaration haben sich 12 Länder, darunter auch die Schweiz, verpflichtet, bis in 10 Jahren die Stickoxidemissionen, ausgehend von einem Bezugsjahr zwischen 1980 und 1985, um mindestens 30% zu reduzieren. Ebenso dringend wäre ein analoges Vorgehen und eine baldige Übereinkunft im Bereich der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen.

Buchbesprechungen

Albert Heim – Katalog, Zürich: ETH-Bibliothek 1988: Albert Heim (1849–1937), Professor für Geologie an ETH und Universität Zürich. Katalog zur Gedenkausstellung 1987. – Schriftenreihe der ETH-Bibliothek 23, 1988. – Preis Fr. 30.–.

Ziel des reich illustrierten Katalogs ist es, die 1987, zum 50. Todestag von Albert Heim, in der ETH-Bibliothek Zürich veranstaltete Ausstellung wiederzugeben.

In einem kurzen Vorwort von Sibylle Franks wird der Schwerpunkt der Ausstellung «Heim als hochbegabter Zeichner» dargestellt. Die Werke, aus denen die Zitate des Katalogs entnommen sind, werden hier aufgeführt.

Eine Zeittafel mit nebenstehendem Portrait des 40jährigen gibt einen ersten Einblick in das Leben und die Charakterzüge Heims. In der Folge werden wichtige Kapitel aus seinem Leben, wie Schüler- und Studienjahre, Berufung, Heirat, Dozentenzeit, Gutachtertätigkeit, Kynologie, in Form von Photos, Aktenausschnitten, Briefabzügen, Zeichnungen nebst Zitaten, näher beleuchtet.

Der Katalog wird vorwiegend mit den vielen, von Heim selbst angefertigten Gebirgs- und Landschaftszeichnungen, Panoramen und Portraits gestaltet.

Es werden Zeichnungen und Aquarelle des Knaben, des Jugendlichen sowie die Werke des reifen Mannes vorgestellt.

Geologische Profile und Situationsskizzen beschränken sich auf die Kapitel Dozentenzeit und Gutachtertätigkeit.

In allen Kapiteln werden die Zeichnungen von Zitaten und Photos der entsprechenden Lebensabschnitte begleitet.

Die Photos zeigen Heim somit immer neben seinen Werken, Projekten, Förderern, Zeitgenossen und Schülern.

Leider fehlen die einzelnen Kolumnentitel des Inhaltsverzeichnisses auf den entsprechenden Seiten. Ständiges Zurückblättern zum Inhaltsverzeichnis ist die Folge.

Die Anordnung der Bilder ist in vielen Fällen recht ansprechend, einige jedoch überlappen sich und schneiden so Texte ab. Dies ist für den Leser mühsam und entwertet den Text.

Als Ganzes vermittelt der gut strukturierte Katalog einen repräsentativen Überblick über Leben und Schaffen Albert Heims. Wie beabsichtigt liegt der Schwerpunkt der Arbeit bei den Illustrationen.

M. Eberhard

Günter Bach: Mathematik für Biowissenschaftler mit BASIC-Programmen, 1989. VI, 330 S., 42 Abb., Preis DM 34.80

Nach einleitenden Kapiteln «Mengenlehre», «Kombinatorik», «Zahlen und Zahlbereiche» werden die einfachsten Begriffe und Sätze aus den folgenden Gebieten dargestellt: Folgen und Reihen, Differential- und Integralrechnung, Differentialgleichungen, lineare Algebra. Den einzelnen Kapiteln sind Basic-Programme (so etwa zur Lösung von quadratischen Gleichungen und von Differentialgleichungen der Form $y' = f(x,y)$) beigefügt. Die Darstellung ist gemütlich, der Stil recht altväterisch (es ist noch die Rede von Variationen von 7 Elementen zur 3. Klasse). Gut gelungen sind die motivierenden Einführungen, zur Integralrechnung etwa: «Die von einem Blatt aufgenommene Lichtenergie ist proportional seiner Fläche. Wie kann man den Flächeninhalt eines solchen, krummlinig begrenzten Bereiches ermitteln?» Die Randkurve des Blattes wird dann zu $y = \pm \sqrt{x}\,(1 - x/3)$, $0 \leq x \leq 3$ idealisiert und die umschlossene Fläche im folgenden berechnet.

Ernst Specker

Arnold Benz: Plasmaphysik. Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen und Techniken, Zürich 1988. 111 Seiten, Preis Fr. 30.–.

Bei dem vorliegenden Bändchen handelt es sich um eine Ausarbeitung von Vorlesungen, die der Autor seit 1983 mehrmals im Rahmen des Wahlfachs Astronomie an der Abteilung für Mathematik und Physik der ETH Zürich gehalten hat. Es ist als eine allgemeine Einführung in die Plasmaphysik gedacht.

Zu Anfang werden die Bewegung eines geladenen Teilchens in elektromagnetischen

itationsfeldern sowie einige grundle-
genschaften des Plasmas behandelt.
:teil des Buches wird dem Leser ein
druck von der Fülle der Erscheinun-
en verschiedenen Arten von `Plasma
iss, stossfrei – mit Stössen etc.) ver-
an sieht, wie sich in jeder Plasmaart
Frequenz, Ausbreitungsrichtung und
on – eine reichhaltige Menge von ver-
n Wellenarten entwickeln kann.
l eine ganze Reihe möglicher Instabi-
iskutiert. Die grosse Stoffmenge
neuere Entwicklungen mit ein. Die
ngen betreffen realistische, aktuelle
hauptsächlich aus der Astrophysik.
'ext ist sehr knapp, oft zu knapp
(was auch einige sprachliche Unge-
en zur Folge hat). Manchmal wird ein
es Resultat anhand eines speziellen
oder aufgrund von Näherungen her-
o dass sein Gültigkeitsbereich nicht
werden kann. (Ein Beispiel ist die
ng der Plasmaschwingungen mittels
speziellen Annahme, wie sie auch in
üchern über Plasmaphysik zu finden
enig mehr Aufwand könnte die Her-
einleuchtender und allgemeiner
werden.)
nblick auf die Komplexität der Phä-
die vielfach noch nicht völlig verstan-
schreibt der Autor: «Nicht zuletzt
ein gewisses intellektuelles Unbeha-
Methoden und Näherungen gegen-
alten bleiben.» Dies ist gewiss eine
Auffassung, jedoch gibt es Fälle, wo
nbehagen nicht aufzutreten brauchte,
etwas ausführlicherer Text zugelas-
(z.B. bei der Herleitung der Fokker-
leichung oder eben der Plasma-
ngen).
ehen von solchen kleineren Mängeln
sagen, dass der Leser eine Einfüh-
das äusserst komplexe Gebiet der
ysik vor sich hat, die (wohl ange-
knappen Raumes) weniger Wert auf
Begründung der Gleichungen legt,
er eine nützliche Übersicht über die
en Phänomene liefert und zum Wei-
n mit Hilfe von mehr ins Detail
Lehrbüchern und Originalartikeln
n diesem Sinne kann das Buch jedem
, der etwas über Plasmaphysik erfah-
te, empfohlen werden.

Armin Thellung

Entomologischer Verein Alpstein, SG: «Inventar der Tagfalter-Fauna (Lepidoptera) der Nordostschweiz und Veränderungen seit der Jahrhundertwende». 132 S. Eigenverlag des Entomologischen Vereins Alpstein, 1989, beziehbar bei Hansjörg Brägger, Lerchenbohlstrasse 52, 8580 Amriswil. Fr. 25.–.

Die Mitglieder des Entomologischen Vereins Alpstein stellten sich zum Ziele, die faunistischen Daten der Tagfalter der NE-Schweiz, d.h. der Kantone AI, AR, GL, SG, TG, SH und des unteren Rheintales von GR, die im Zeitraum 1960–1978 ermittelt wurden, übersichtlich zusammenzustellen.

Zielsetzung war einerseits, die für diese Jahre wesentlichen Ergebnisse der Beobachtungen und Fänge von 21 aktiven Mitgliedern festzuhalten und allfälligen Interessenten zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich sollten damit auch Grundlagen zur Beurteilung allfälliger noch zu erwartender Veränderungen an der bestehenden Fauna geschaffen werden.

Bei der Bearbeitung wurde Bd. II von W. Forster und T. A. Wohlfahrt, Die Schmetterlinge Mitteleuropas, 2. Auflage 1976, zugrundegelegt.

Die in den Publikationen von Täschler, M., 1970, 77, 1902, Kilias, E., 1998, Wehrli, E., 1913, und Müller-Rutz, J., 1929/30, vorliegenden Angaben erlauben es auch, gesicherte Hinweise über die Veränderungen an der Fauna während des vergangenen Jahrhunderts zu geben.

Für die einzelnen Arten werden jeweils die wesentlichen Fundorte, deren Höhenlagen und die jahreszeitlichen Daten festgehalten und zusätzlich in graphischen Darstellungen wiedergegeben.

Die vorliegende Arbeit weist im Detail darauf hin, welche Tagfalter-Arten seit der Jahrhundertwende sowohl punkto Bestandesdichte wie auch Verbreitungsareal Verluste erlitten haben (69) bzw. überhaupt nicht mehr festgestellt werden konnten (6).

Ausser diesen eher negativen Feststellungen, für die auch Ursachen angeführt werden, ergibt sich, dass immerhin 7 Arten für den Beobachtungsraum neu festgestellt werden konnten. Hiervon ist Mellicta britomartis Assm. für die Schweiz erstmals nachgewiesen. Als bescheidenes weiteres Positivum kann festgehalten werden, dass 3 Arten bezüglich Häufigkeit bzw. Verbreitung zugenommen haben.

Aus der hier kurz umschriebenen Verschiedenartigkeit der möglichen Änderungen am Lepidopteren-Bestand der Nordostschweiz ergibt sich eindrücklich die Empfehlung nach weiterer und andauernder exakter Beobachtung der Fauna. Dies betrifft natürlich nicht nur die Lepidopteren, dies ist eine allgemein bestehende Aufgabe.

Janett Florin

Flindt Rainer, Biologie in Zahlen, 283 Seiten, 307 Tabellen, 13 graphische Darstellungen, 3. Auflage 1988, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, DM 39.–.

Das vorliegende Buch erlebt nun innerhalb von nur 5 Jahren seine dritte Auflage. Diese Neuauflage ist gegenüber der ersten Ausgabe leicht erweitert und durchgesehen worden. Zu den 305 Tabellen sind in den Teilen eins und zwei je eine weitere hinzugekommen, und es wurden einigen Tabellen insgesamt 13 graphische Darstellungen zur Veranschaulichung derselben beigefügt. Zudem wurden die Literatur auf den neuesten Stand gebracht und das Verzeichnis um ca. 30 Zitate erweitert.

Das Buch ist in 5 Teile gegliedert, die recht unterschiedlichen Umfang haben. Der erste Teil beinhaltet zoologische Werte (141 Tabellen), der zweite befasst sich mit botanischen Angaben (76 Tabellen), der kurze dritte Teil gibt Zahlen aus der Mikrobiologie wieder (8 Tabellen), und dem vierten Teil sind Details aus dem Gebiet der Humanbiologie zu entnehmen (82 Tabellen). Im letzten fünften Teil werden vergleichende Werte der verschiedensten Lebewesen aufgeführt (13 Tabellen).

Während meiner beruflichen Tätigkeit als Biologin und Lehrerin an Mittel- und Berufsschulen wäre ich in früheren Jahren öfters dankbar gewesen, wenn ich Zugriff zu einem solchen Buch gehabt hätte. Viele Fragen von Schülern und auch meinerseits mussten unbeantwortet bleiben, weil einerseits die einschlägige Literatur zu deren Beantwortung und andererseits die Zeit zum Heraussuchen derselben in den verschiedenen Bibliotheken fehlte. Die Tatsache, dass nun innerhalb so kurzer Zeit eine dritte Auflage notwendig geworden ist, macht deutlich, dass das Buch sein breites Zielpublikum erreicht und dort eine grosse Lücke schliesst.

Es versteht sich von selbst, dass auch mit diesem Buch nicht alle Fragen beantwortet werden können, doch es vermag sicher einen grossen Teil der Antworten zu geben, die man darin sucht. Mehr noch: Es fordert direkt heraus, sich Fragen auszudenken, deren Antworten man in den Seiten zu finden hofft. Dies kann zeitweise so fesselnd sein, dass die eigentliche Frage, die am Anfang stand, vergessen wird und man wie in einem Guinnessbuch der Rekorde zu lesen beginnt.

Das Arbeiten mit dem Buch würde meiner Meinung nach zusätzlich erleichtert, wenn Namen- und Allgemeinregister zu einem einzigen kombiniert und dieses erweitert worden wäre, wenigstens um die lateinischen Gattungsnamen. So wäre es zum Beispiel dem Leser sofort klar, dass es sich bei den Angaben von Mammutbäumen auf Seite 145 um zwei verschiedene Arten handelt, nämlich um Sequoiadendron (Tab. 2.3.8.) und um Sequoia (Tab. 2.3.9.).

Es ist mir bewusst, dass ein solcher Wunsch einen grossen Mehraufwand erfordern würde, müssten doch viele Tabellen durch diese Erweiterung umgestaltet und neu konzipiert werden. Vielleicht sei dies eine Anregung für eine spätere Neubearbeitung.

Im Vergleich zur ersten Ausgabe wurden die Tabellen neu mit mehr Begleittext und Literaturhinweisen versehen. Bei der Verankerung der Stichworte im Textteil sind jedoch gelegentlich nicht alle Zitate aufgeführt worden. Beispielsweise erscheint der Begriff «Grundumsatz» auch auf den Seiten 218 und 220 und ist dort sogar erklärt.

Das Buch kann allen, die sich irgendwie mit allgemeiner Biologie beschäftigen, wärmstens empfohlen werden. Diese Empfehlung schliesst bis zu einem gewissen Bereich auch Doktoranden und Wissenschafter mit ein, obwohl diese nicht als Zielpublikum angesprochen wurden. Diese Datensammlung erlaubt es ihnen nämlich, innert kurzer Zeit Werte zu finden, mit denen sich Hochrechnungen machen lassen oder mit denen Hypothesen dimensionsmässig überprüft werden können.

Livia Bergamin Strotz

Hinweise für Autoren

1 **Manuskript**

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

.3 Einzelheiten zum Text

.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle . . .).

.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild . . .) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

**Vierteljahrsschrift der
Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 135, Heft 1, März 1990**

Inhalt

Preis Fr. 18.–

Heft 2
Jahrgang 135
Juni 1990

VIERTELJAHRSSCHRIFT
R NATURFORSCHENDEN
SELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

OF Orell Füssli Zeitschriften
Graphische Betriebe AG

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85,* zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 78.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich).* – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042–5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/2*: 73–88

Langzeitverlauf von Krankheiten im Kindesalter[1]

Walter H. Hitzig, Universitäts-Kinderklinik Zürich

Zum Abschied von meiner Lehrtätigkeit am Kinderspital Zürich demonstrierte ich den Studenten Langzeitbeobachtungen aus meinem engeren Arbeitsgebiet, der Hämatologie. Als Leitmotiv ist ein entscheidender Einfluss der ärztlichen Erkenntnisse und Eingriffe auf die Lebensqualität bzw. auf das Überleben der Kinder zu erkennen. – Die Patienten wiesen folgende Probleme auf:

1. Eine angeborene Anomalie des roten Blutfarbstoffs (Hämoglobin Zürich), die an sich harmlos ist, aber nach Behandlung mit gewissen Medikamenten zu Blutzersetzung (Hämolyse) führt: Beispiel einer iatrogenen Krankheit.

2. Eine Krebserkrankung der Niere (Nephroblastom), die zum Verständnis der malignen Entartung von Körpergeweben beiträgt. Das Kind konnte durch kombinierte Behandlung geheilt werden, aber eine Arznei-Nebenwirkung führte später zu einer schweren Herzschädigung, die eine Herztransplantation notwendig machte.

3. Eine Leukämie bei einem 4jährigen Mädchen, die vor 23 Jahren geheilt werden konnte, so dass die herangewachsene Patientin später heiraten und zwei gesunde Kinder gebären konnte.

4. Eine mit dem Leben nicht vereinbare angeborene Störung der Abwehrsysteme (Schwerer Kombinierter Immundefekt = SCID), die wir durch Knochenmark-Transplantation heilen konnten.

Longterm Observations of Diseases in Childhood

In my fare-well lecture on retiring from the Kinderspital Zürich, I discussed with the students longterm observations in patients with blood diseases. As a common denominator I pointed out the decisive influence of medical knowledge and skills on quality of life or on survival of these children. – The patients presented the following problems:

1. A hereditary hemoglobin anomaly (Hb Zürich): the bearers of this gene are essentially asymptomatic, but suffer severe hemolytic attacks after ingestion of sulfonamides and other drugs. – This is a typical example of an iatrogenic disease.

2. A cancer of the kidney (nephroblastoma, Wilms-tumor) which may help to understand the pathogenesis of malignant degeneration. This child was cured by combined therapy, but toxic side-effects of a drug damaged the myocardium and later necessitated a heart transplantation.

3. A case of leukemia in a 4-year-old girl was successfully treated 23 years ago. She could later lead a normal life, got married and gave birth to two normal children.

4. A boy with familial congenital severe combined immunodeficiency syndrome (SCID) was successfully treated by bone-marrow transplantation two years ago and is now normally developped.

1 Einleitung

Ich möchte heute ausnahmsweise über Langzeitbeobachtungen in der Pädiatrie sprechen. Diese Erfahrung sollte der Student im Wahlstudienjahr erwerben, während in unserer Vorlesung vorwiegend statische Krankheitsbilder geschildert werden. Ich betone den starken Einfluss der Persönlichkeit meines Lehrers Guido Fanconi, der mir schon in meiner Studienzeit durch seinen the-

[1] Nach der Abschiedsvorlesung vom 6. Juli 1989, gekürzt und umgearbeitet.

rapeutischen Optimismus bei schweren oder chronischen Krankheiten grossen Eindruck machte. Ein Schlüsselerlebnis war eine Patientin mit tuberkulöser Meningitis – also einer Diagnose, die damals ein absolutes Todesurteil bedeutete; Fanconi schloss die Vorstellung in seiner begeisternden und leicht theatralischen Art mit der Bemerkung ab: «Aber ich werde das Kind heilen!», wobei er sich auf das damals eben verfügbar gewordene Streptomycin verliess. Tatsächlich konnte er uns das Kind am Schluss des Semesters geheilt wieder vorstellen.

2 Hämoglobin-Zürich-Syndrom

Die erste Patientin, Ursula, ist 1957 geboren. Mit 7 Monaten wurde sie wegen einer banalen Otitis media medikamentös behandelt; nachträglich kann man vermuten, dass sie anschliessend gelb und blutarm wurde. Mit 2¾ Jahren bekam sie wegen einer febrilen Erkrankung während 5 Tagen ein Sulfonamid; statt einer Heilung trat aber eine Verschlechterung ein, so dass Ursula schwer anämisch ins Kinderspital Zürich eingewiesen werden musste.

Wir fanden im Blutbild (Bild 1) eigenartig verformte Erythrozyten mit grossen Löchern; im Retikulozytenpräparat entsprachen diesen sehr grosse Innenkörper, wie man sie bei Vergiftungen kannte. Sie erscheinen z.T. aus den Zellen herausgefallen oder ausgestossen. Daneben besteht eine hohe Retikulozytose. Wegen der schweren Anämie mussten wir zweimal Blut transfundieren; dadurch und dank guter eigener Blutregeneration, die aus den hohen Retikulozytenzahlen abzulesen ist, erholte sich das Kind in wenigen Tagen (Bild 2). Das Blut normalisierte sich, da die Innenkörper in wenigen Tagen verschwanden.

Die naheliegende Diagnose einer hämolytischen Anämie durch Autoantikörper konnte mit dem Coombs-Test, der negativ war, schnell ausgeschlossen

Bild 1 Blutbild der Patientin Ursula S. nach Sulfonamid-Exposition. Supravitalfärbung mit Brillantkresylblau mit Darstellung der (normalen) Retikulozyten und der (pathologischen) Innenkörper. Letztere bestehen aus präzipitiertem Hb-Zürich, sie werden aus dem Erythrozyten ausgestossen, und dieser geht dabei zugrunde: hämolytische Anämie.

Fig. 1 Blood picture of patient Ursula S. after exposure to sulfonamides. Supravital-stain with brillantcresylblue, demonstrating the (normal) reticulocytes and the (pathological) inclusion bodies. The latter are made up of precipitated hemoglobin Zürich. The erythrocyte extrudes them and is at the same time destroyed: hemolytic anemia.

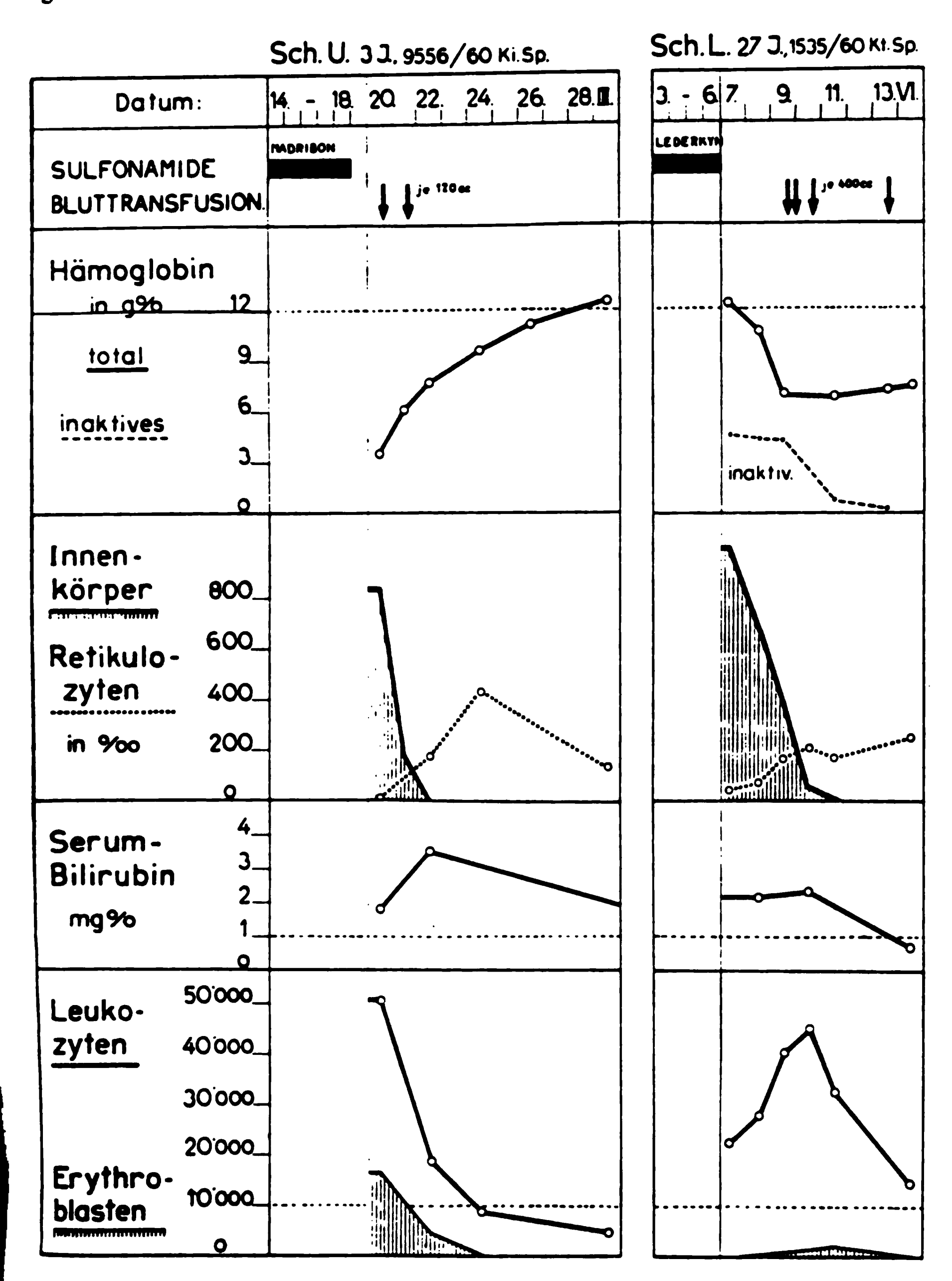


Bild 2 Hämoglobin Zürich-Syndrom: Verlauf der hämatologischen Befunde bei der Tochter Ursula (links) und ihrem Vater (rechts).

Fig. 2 Hemoglobin-Zürich syndrome: time sequence of the hematologic findings in the daughter Ursula (left) and in her father (right).

werden. Auch die damals neue Möglichkeit eines Enzymmangels in den Erythrozyten wurde ausgeschlossen. Dagegen konnten unsere Kollegen Betke und Kleihauer in Freiburg in der ebenfalls neu eingeführten elektrophoretischen Untersuchung neben dem normalen Hämoglobin A ein anderes Hämoglobin finden, das nicht dem fötalen Hämoglobin F entsprach: Tatsächlich lag ein neues Protein vor, das später die Bezeichnung «Hämoglobin Zürich» erhielt (W. H. Hitzig et al., 1961).

Dieses Hämoglobin wurde in Holland weiter untersucht. Damals war gerade die Struktur und die Aminosäurensequenz des Hämoglobins bekanntgeworden. Nun zeigte es sich, dass in der Beta-Kette ein normalerweise in Position 63 vorkommendes Histidin beim «Hämoglobin Zürich» durch Arginin ersetzt ist. Diese Stelle ist kritisch, weil Histidin den Kontakt zum Häm herstellt.

Nun zurück in die Klinik: Etwa 2 Monate, nachdem Ursula geheilt entlassen worden war, musste ihr Vater wegen einer schweren hämolytischen Anämie in der Medizinischen Klinik hospitalisiert werden. Der Krankheitsverlauf war fast identisch (Bild 2): Anämie mit 87% Innenkörpern, hohe Retikulozytose, Ikterus, aber rasche Erholung nach 2 Bluttransfusionen. Dieser Patient hatte ein anderes, damals neu eingeführtes Sulfonamid bekommen, das besonders lang wirkte und deswegen sein Blut noch länger schädigte.

Nun lag die Idee nahe, dass eine familiäre Erkrankung vorliege. Gerade damals kam, wie gerufen just vor den Sommerferien, ein arbeitswilliger Student zu mir. Ich schlug ihm also vor, dieser Familie nachzureisen. Das Ergebnis war ein grosser Stammbaum (Bild 3) mit vielen Trägern des «Hämoglobins Zürich» (U. G. Stauffer, 1961), die alle gesunde Leute sind. Der Erbtyp

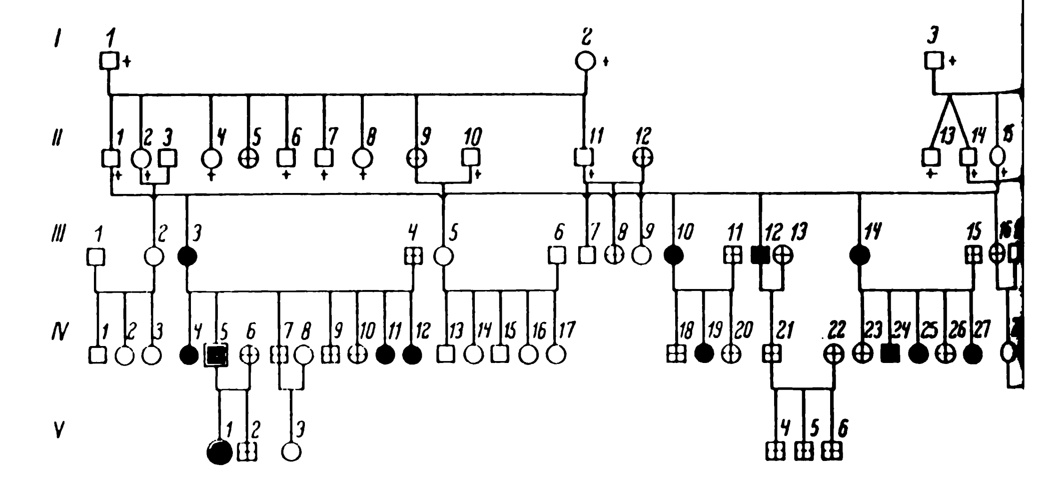


Bild 3 Hämoglobin Zürich-Syndrom: Stammbaum der Sippe (Stauffer).
Hemoglobin-Zurich syndrome: pedigree of the sib (Stauffer).

ist autosomal-dominant, d. h. die Träger sind heterozygot für das pathologische Hämoglobin. – Der Student hiess Urs Stauffer, er kam später zu uns in die Pädiatrie, wurde dann aber zudem Chirurg und ist heute der Chef unserer kinderchirurgischen Klinik.

Unsere Patientin Ursula blieb seither vor hämolytischen Krisen verschont. Sie entwickelte sich normal, machte nach der Schule eine Lehre als Röntgenassistentin, arbeitete als solche auch eine Zeitlang hier im Kinderspital und bildete sich dann zur Sozialpädagogin aus. Leider konnte sie heute nicht kommen, weil sie im Ausland ist, aber ihr Vater ist hier, und er ist bereit, uns einige Fragen zu beantworten.

«H: Würden Sie uns bitte berichten, wie es damals bei Ihnen weiterging?

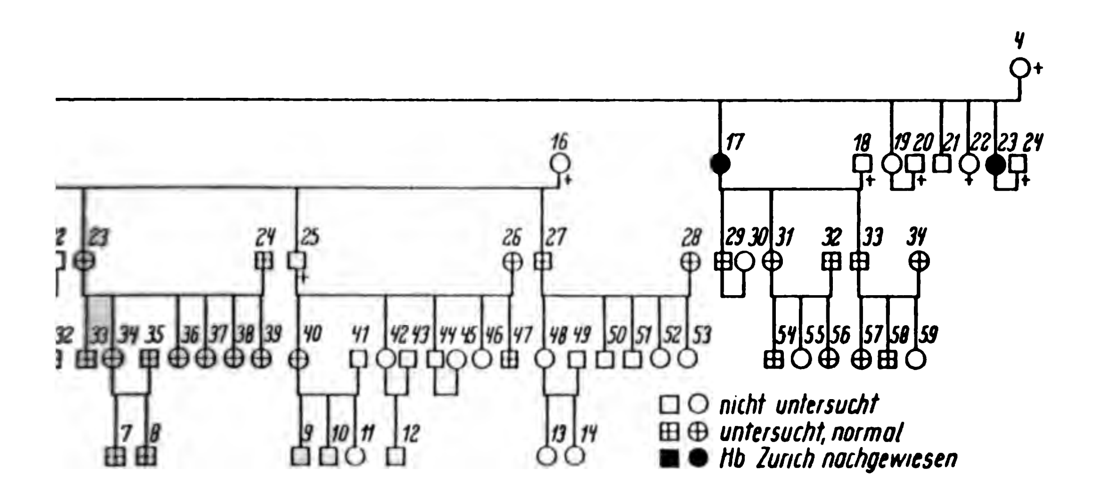
V: Ich war damals Wagenführer bei der VBZ und verlor infolge meiner Krankheit die Stelle.

H: Was haben Sie dann gemacht?

V: Wie immer im Leben, hat alles Negative auch seine positive Seite. Der Verlust der Stelle zwang mich, zu überlegen, was ich tun solle. Ich aktivierte meinen Traum von der Weiterbildung und besuchte wieder die Schule. Jetzt habe ich einen recht guten Posten, bin sehr zufrieden, glücklich und gesund.

H: Sie sind Personalchef bei der Wasserversorgung Zürich, d. h. Sie sind sozial aufgestiegen und müssen nicht mehr einen Tramwagen durch den Verkehr steuern. – Als Wagenführer hatten Sie häufig Erkältungen, die Sie selber mit verschiedenen Medikamenten zu bekämpfen suchten; tun Sie das jetzt auch noch?

V: Nein. Mit Medikamenten bin ich sehr zurückhaltend. Ich nehme nur das,



was ich kenne und von dem ich weiss, dass es mir nicht schaden kann. Darum geht es mir immer gut.

H: Sie haben eine Liste mit den Medikamenten, die Sie meiden müssen, und daran halten Sie sich. Aber Sie hatten doch einen Onkel, der die Verbote immer wieder vergessen hat und der einigemal schwere Attacken hatte.

V: Das ist richtig. Er hat es nicht vergessen, sondern er hat es nicht so richtig geglaubt. Er meinte immer: ‹Ich bin stärker als Du. Mir macht das weniger.›

H: Wir sehen also, dass eine Krankheit auch positive Seiten haben kann; vielen Dank!»

2.1 Hämoglobinopathien im allgemeinen

Sie wissen ja, dass Hämoglobinopathien weltweit von Bedeutung sind; die Tabelle 1 zeigt die äusserst farbige Symptomatik: dass eine Anämie entsteht, ist klar; es gibt aber auch Polyzythämien. Ikterus ist eine häufige Begleiterscheinung einer Hämolyse, ebenso Herzinsuffizienz. Zyanose kann bei abnormer Sauerstoffbindung auftreten, Hämaturie, Hämorrhagie, Ulcus cruris, Gefässverschlüsse und Lungeninfarkte etc. beruhen auf komplizierterer Pathogenese. – Sie sehen also, dass ich gute Gründe hatte, auf der Visite gelegentlich zu sagen, die Hämatologie sei nicht eine Spezialität, sondern die Medizin an sich, weil jeder Mensch auch ein hämatologisches Problem habe; meine Assistenten belächelten mich deswegen wahrscheinlich.

Tabelle 1 Symptome als Folgen von Hämoglobinopathien

Table 1 Symptoms and signs resulting from hemoglobinopathies

Anämie, Polyzythämie	Herz-Insuffizienz
Ikterus	Lungeninfarkt
Zyanose	Arthritis
Hämaturie	Neuropathie
Hämorrhagien	Nebennieren-Insuffizienz
Ulcus cruris	Hämochromatose
Gefäss-Verschlüsse	Diabetes mellitus
– zerebrovaskuläre	Pseudotumor cerebri
– retinale	Infertilität
– myokardiale	Priapismus
– pulmonale	Osteomyelitis
– ossäre	et cetera...

2.2 Vererbte Anomalien

Wir haben es hier mit einer konstitutionellen Anomalie zu tun; diese sind heute auch eine Domäne der Pädiatrie, die verpflichtet ist, Normvarianten zu erkennen und zu studieren. Da sie häufig vererbt sind, müssen wir uns auch mit Genetik beschäftigen. Solche Anomalien können stumm sein und erst bei aussergewöhnlichen Belastungen – die man als Realisationsfaktoren bezeich-

net – manifest werden. Hier waren es Medikamente, speziell Sulfonamide, die das Hb Zürich unlöslich machten. Es gibt aber noch viele andere schädigende Stoffe, die wir in vitro austesten konnten; sie stehen in der Liste, die im Gespräch erwähnt wurde.

Wir sollten immer daran denken, dass iatrogene, also durch den Arzt ausgelöste Erkrankungen, unter allen Umständen vermieden werden müssen – ein wichtiges Postulat, dessen Bedeutung in Zukunft sicher noch zunehmen wird. Ich möchte Ihnen deswegen die oft wiederholte Bemerkung meines internmedizinischen Lehrers Albert Schüpbach weitergeben: Bei der Behandlung soll gelten «beaucoup de soins et peu de drogues». – Bei unserer aus der Innerschweiz stammenden Familie ist es möglich, ja eigentlich sehr wahrscheinlich, dass Wilhelm Tell zu ihren Vorfahren gehörte und auch er Träger des «Hämoglobins Zürich» war; es ist ganz sicher, dass er unser Nationalheld wurde und nie krank war, weil es damals noch keine Sulfonamide gab. – Die Medizin hat also auch ihre Nachteile, die der Arzt kennen und meiden muss.

Zum besseren Verständnis dieser Zusammenhänge müsste man Biochemiker sein; ich konnte mich immer auf die gründlichen Kenntnisse von Dr. P. Tuchschmid verlassen, der Chemie und Medizin studiert hat und dem ich diese Patienten deswegen voll Zuversicht übergeben konnte.

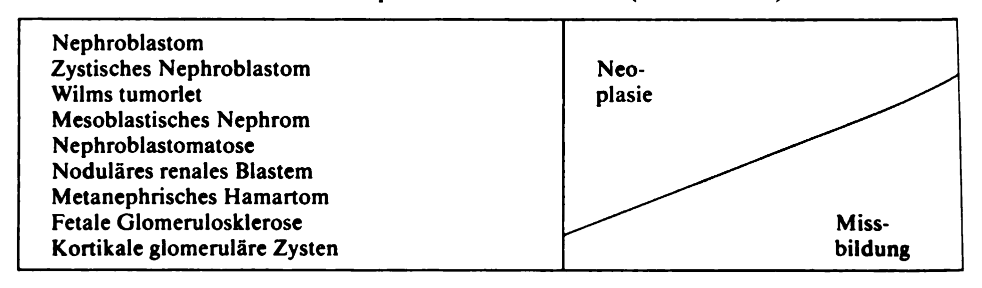
3 Krebs bei Kindern

Der zweite Patient, Pascal, führt uns in ein ganz anderes Gebiet. Er ist heute gut 17 Jahre alt, und wir kennen ihn seit seinem 5. Lebensjahr. Er kam damals wegen eines grossen Bauchs und Koliken, und die Diagnose eines Nephroblastoms lag auf der Hand. Wir haben ihn mit unseren Chirurgen zusammen behandelt, die ihn zunächst operierten und dabei den vermuteten Nierentumor entfernten. (Hier folgte für die Studenten eine kurze Rekapitulation des Krankheitsbildes, das im Laufe des Semesters besprochen worden war: Das Nephroblastom ist eine embryonale Mischgeschwulst der Niere, die vor allem in den ersten Lebensjahren auftritt. Symptome: Tumor in abdomine, Hinweise auf Niere oder Harnwege, ohne Behandlung rapide lokale Ausbreitung und Bildung von Lungen- oder Knochenmetastasen, Tod innert Wochen bis Monaten.)

Der Tumor ist von grossem theoretischem Interesse zum Verständnis der Karzinogenese im allgemeinen. Zuerst fanden Pathologen alle Übergänge zwischen Missbildungen und maligner Neoplasie, die mit zahlreichen Zwischenstadien dokumentiert werden können (Tabelle 2). Die meisten in ihrer Entwicklung «verunglückten» Zellansammlungen werden im Lauf der Embryonal- und Fötalzeit wieder resorbiert oder wachsen nicht mehr weiter. Selten kommt es zur malignen Transformation. – In dieser engen Beziehung zur Embryologie unterscheiden sich die pädiatrisch-onkologischen Leiden wesentlich von den Tumorerkrankungen bei Erwachsenen.

Tabelle 2 Übergänge zwischen Neoplasie und Missbildung (nach J. Briner)

Table 2 Transitions between neoplasia and malformation (after J. Briner)



Nephroblastom	
Zystisches Nephroblastom	Neo-
Wilms tumorlet	plasie
Mesoblastisches Nephrom	
Nephroblastomatose	
Noduläres renales Blastem	
Metanephrisches Hamartom	
Fetale Glomerulosklerose	Miss-
Kortikale glomeruläre Zysten	bildung

Eine zweite Besonderheit der Malignome im frühen Kindesalter verbessert unser Verständnis für die Umwandlung einer normalen Zelle in eine Krebszelle, und dabei ergibt sich wieder eine Beziehung zur Genetik: Man fand vor einigen Jahren, dass im Tumorgewebe des Nephroblastoms eine chromosomale Anomalie vorkommt, nämlich eine Deletion im kurzen Arm des Chromosoms 11 an der Stelle p 13 (C 11 del p 13). Es ist nun interessant, dass in der unmittelbaren Nachbarschaft ein Onkogen sitzt, also ein Gen, das proliferative Eigenschaften steuert und das bei Tumoren häufig aktiviert ist (Chr. Moroni, 1989). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Expression dieses Onkogens normal und nicht, wie vermutet, erhöht ist. Dagegen wurde kürzlich erkannt, dass die Expression eines anderen Wachstumsfaktors, des «insulin like growth factor» (IGF 2) etwa auf das 70–120fache erhöht ist (J.-C. Irmiger et al., 1989). Das für IGF 2 kodierende Gen ist ebenfalls auf dem Chromosom 11 in nächster Nähe der Deletion p 13 lokalisiert. Es ist deswegen wahrscheinlich, dass die enorme Aktivierung des IGF 2-Gens unmittelbar mit dem unkontrollierten Wachstum des Tumors zusammenhängt. – Dieses Beispiel zeigt, dass die pädiatrische Onkologie zum Verständnis der Pathogenese maligner Tumoren im allgemeinen beitragen kann. Obschon Tumoren bei Kindern selten vorkommen, ist ihr genaues Studium für die Forschung von grosser Bedeutung.

Wie ging es nun mit Pascal weiter? – Wir haben ihn in der üblichen Art behandelt: Nach der Operation, die zur Einstufung des Tumors als Grad III führte, wurde er nachbestrahlt und anschliessend mit Zytostatika behandelt. Noch vor Abschluss dieser Kur mussten wir leider eine neue Aktivität in Gestalt einer Metastase im rechten Lungenoberlappen feststellen. (Hier folgte ein Exkurs über Kinderzeichnungen, mit denen wir uns unter Anleitung der ebenfalls anwesenden Psychologin Susan Bach aus London intensiv beschäftigt haben; dieser Passus würde hier stören und wird deswegen weggelassen.)

Weil die Prognose des Nephroblastoms bei kombinierter Therapie gut ist (Tabelle 3), waren wir in dieser zunächst bedenklich erscheinenden Situation ·bedingt zur Fortsetzung der Behandlung verpflichtet: Lungenmetastasen ss man operativ resezieren und anschliessend erneut zytostatisch behan-

deln. Pascal erhielt nach der Operation, bei der nur ein kleines Stück der Lunge mit der Metastase entfernt werden musste, wieder eine Zytostatika-Kur mit einer Totaldosis von 68 mg/m² Adriamycin. Es war damals noch nicht bekannt, dass dieses Mittel eine toxische Nebenwirkung auf das Herz haben kann.

Leider hat sich dieser Effekt aber kurze Zeit später bei Pascal manifestiert: Er zeigte Anzeichen einer Herzinsuffizienz, die man jedoch relativ einfach beheben konnte. Im Laufe der folgenden Jahre erwies sich die Herzschädigung aber als progressiv, so dass der Knabe von seinem 13. Lebensjahr an körperlich eingeschränkt war und unter häufigen Angina-pectoris-Anfällen litt. Nach gründlicher Überlegung wurde deswegen der Entschluss zur Herztransplantation gefasst, die im Alter von 15 Jahren von Prof. Turina durchgeführt wurde. Sie bewirkte eine dramatische Verbesserung von Pascals Zustand; dazu sagte er.

«P: Ich gehe in die Schule, spiele Gitarre. Ich gehe ins Gymnasium, Abteilung I, lerne griechisch und lateinisch.

H: Das ist Dir aber nicht genug. Was lernst Du noch dazu?

P: Russisch, aber ich mache nicht sehr viel dafür, es ist nur ein Freifach.

H: Du bist auch ein grosser Vogelkenner?

P: Das ist jetzt zugunsten des Computers etwas in den Hintergrund getreten.

H: Wie ist Deine körperliche Leistungsfähigkeit?

P: Ich komme gut durch.

H: Wie ich hörte, bist Du einmal mit dem Velo von Winterthur zur Kontrolle nach Zürich gekommen.

P: Ja.

H: Du bist also normal leistungsfähig; wie war das vor der Operation?

P: Im Herbst 1986 konnte ich nur noch im Bett liegen.

H: Pascal spricht nicht gern darüber. Aber sein Vater möchte noch etwas dazu sagen. – Sie mussten in diesen Jahren vieles durchmachen. Es ist schwer, eine solche Krankheit anzunehmen, aber Ihnen scheint es weitgehend gelungen zu sein.

V: Das Problem besteht darin, dass die Lebensfreude eines Kindes nicht zu stark beeinträchtigt werden darf. Wir hatten schon am Anfang, aber vor allem 1986, als die Herzinsuffizienz bestand, die Erfahrung gemacht, dass bei geistiger Regsamkeit die körperlichen Funktionen weitgehend zurücktreten können. So hat Pascal eigentlich ganz gut gelebt, abgesehen von den starken Anfällen, die sich manchmal nächtelang wiederholten. Er konnte nicht einmal mehr lesen, wir mussten ihm vorlesen und haben ihm viel erzählt, doch er hatte viele Interessen. Es war trotz allem eine schöne Zeit.

H: Fiel Ihnen der Entschluss zur letzten Operation schwer?

V: Es gab nur noch diese Möglichkeit. Wir wussten natürlich nicht, was für Folgen das haben könnte. Es hat sich in jeder Hinsicht gelohnt. Doch die ganze Zeit, die dem Jungen zwar viele Einschränkungen auferlegte, war eine gute Zeit.»

Wir hören zum zweitenmal, dass eine Krankheit auch positive Auswirkungen haben kann.

Wenn wir zusammenfassen, haben wir einen malignen Tumor vor uns, der an sich eine gute Prognose hat. Wir behandeln ihn richtig; es tritt aber eine Metastase auf, die wir ebenfalls wirksam behandeln können. Nun kommt es zu einer Nebenwirkung eines Medikaments, die wie gesagt damals noch nicht bekannt war. Heute limitieren wir die Menge des Adriamycins, die wir verabreichen dürfen. Und nun stehen wir vor der Entscheidung, ob alle technischen Möglichkeiten der heutigen Maximalmedizin für einen bestimmten Patienten wirklich eingesetzt werden sollen. Wir haben uns hier nach ausführlichem Überlegen, zusammen mit dem Patienten und seiner Familie, dafür entschlossen und glauben, dass dieser Entschluss richtig war.

4 Akute Lymphatische Leukämie (ALL)

Die jetzt 27jährige Karin kam im Alter von 4 Jahren in unsere Poliklinik. Die Diagnose einer Akuten Lymphatischen Leukämie war auf Grund der typischen Symptome schnell gestellt. Die Symptome sind einerseits Folge der Infiltration des Knochenmarks und beruhen andererseits auf Auswirkungen einer Markhemmung: Da die Bildung aller normalen Knochenmarkzellen beeinträchtigt ist, kommt es im Blut zu Zytopenien, und zwar beim roten, weissen und Thrombozytensystem. Daraus resultieren die Symptome einer Anämie, wie Müdigkeit und Blässe, ferner gehäufte Infektionen und verstärkte Blutungsneigung. Wenn die Wucherung über das Knochenmark hinausgeht, können ferner auch blastomatöse Symptome auftreten, also Anzeichen der Infiltration von Organen, vor allem Lymphknoten, Leber und Milz, sowie bei Kindern zudem auch häufig Infiltrate der Knochen.

Bei drei Vierteln der Patienten fällt den Eltern die Blässe auf, die Hälfte leidet an Infektionen, ein Drittel an Blutungen und ein Drittel an Skelettschmerzen. Die erste ärztliche Untersuchung bestätigt fast immer vergrösserte Lymphknoten und Blässe, bei zwei Dritteln vergrösserte Leber und Milz und häufig die Zeichen einer hämorrhagischen Diathese, d. h. grosse flächenhafte Blutungen (Suffusionen) neben kleinen punktförmigen (Petechien). Dann sind die sehr eigenartigen Infektionen hervorzuheben: Es gibt keine Eiterbildung, sondern nur areaktive Nekrosen oder Neigung zur Exsudation (Austritt von Blutflüssigkeit ins Gewebe).

In dieser auffallenden klinischen Situation ist das Blutbild diagnostisch häufig hilfreich, das Knochenmark praktisch immer beweisend: Es ist völlig von gleichartigen, meist sehr grossen Zellen durchsetzt, die in Haufen liegen und oft fast kein Zytoplasma haben. Die Knochenmarkpunktion kann in we-
en Sekunden durchgeführt werden, und wir finden sie wenig traumatisch.
sie eine grosse Aussagekraft besitzt, sollte man sie nicht verzögern, wenn

die Möglichkeit oder nur ein geringer Zweifel besteht, dass eine Leukämie vorliegt.

Wir haben die kleine Karin damals mit zytostatischen Medikamenten behandelt. Nach 4 Wochen war ihr Knochenmark in Remission, d. h. es enthielt wieder alle Zellarten in verschiedenen Reifungsstadien. Entsprechend normalisierte sich der klinische Zustand in etwa 2 Monaten. Die Chemotherapie wurde leicht reduziert fortgesetzt, bis das Kind 9 Jahre alt war, also 5½ Jahre lang. Heute sind die Chemotherapien intensiver, aber viel kürzer; damals gab es aber erst wenig Erfahrung. Bis zum Alter von 19 Jahren haben wir Karin weiter kontrolliert. Sie hat in der Zwischenzeit einige Krankheiten, Windpokken, Masern und eine Appendizitis, durchgemacht; alles ist ganz normal abgelaufen. Sie hat geheiratet und zwei gesunde Kinder geboren. Trotz Beanspruchung durch die familiären Pflichten ist sie heute mit ihrem 4jährigen Söhnchen hierher gekommen, wofür ich ihr danke.

«H: Wie Sie mir sagten, haben Sie mit 20 Jahren beschlossen, ein neues Leben anzufangen. Wie war das?

K: Man sagte mir immer, ich sei geheilt, doch ich musste nach wie vor zur Kontrolle. Und ich sagte mir dann ‹Jetzt gehe ich nicht mehr, ich bin ja geheilt›. Der Hausarzt sagte immer, ich sei krank gewesen, und es sei ein Wunder, dass ich geheilt sei. Ich beschloss dann also, ein ganz normales Leben zu führen, wie alle anderen Leute. Ich sprach vorher noch mit Dr. Plüss und fragte ihn, wie das sei mit Heiraten und Kindern. Er sagte mir, dass da keine Probleme bestünden, und so sagte ich mir, jetzt führe ich ein normales Leben.

H: Was für Schulen haben Sie besucht?

K: Primarschule, Sekundarschule, dann 1 Jahr Welschland, anschliessend KV.

H: Dann arbeiteten Sie. Und jetzt?

K: Jetzt nicht mehr, jetzt habe ich 2 kleine Kinder.»

Sie sehen also, dass unsere ehemalige Patientin wirklich vollkommen geheilt ist und sich auch psychisch wohl fühlt.

Diesen Teil meiner Tätigkeit, die Onkologie, habe ich seinerzeit von meinem Lehrer Conrad Gasser quasi in statu nascendi übernommen. Gasser war ein ganz bedeutender pädiatrischer Hämatologe, dessen Leistungen im Lauf der Zeit immer klarer hervortreten. Er war der erste in Europa, vielleicht sogar in der Welt, der Langzeit-Remissionen von Leukämien beschrieb und der zu sagen wagte: «Ich glaube, dieser Patient könnte geheilt sein.» – Ich kann mich gut erinnern, dass noch viel später, als es für uns eine gesicherte Tatsache war, dass man Kinder von Leukämien heilen kann, manche Internisten uns als naiv und leichtgläubig belächelten; heute zweifelt niemand mehr daran.

In Tabelle 3 ist die Heilungsrate mit 60% angegeben. Hier ist aber nach dem Subtyp der Leukämie zu differenzieren; so kann bei gewissen Formen der Akuten Lymphatischen Leukämie heute in 80–90% eine Heilung möglich sein. Die Typisierung der ALL-Form ist deswegen wichtiger geworden, weil

man prognostisch günstige Fälle kürzer und weniger intensiv behandeln kann, während bei schlechtem Risiko längere und intensivere Kuren vorzusehen sind.

Tabelle 3 Maligome im Kindesalter: Heilungsraten in %

Table 3 Malignant diseases in infants: cure rates, in percent

Akute Leukämien	0– 60
Nephroblastom	75
Neuroblastom	0–100
Osteogenes Sarkom	30– 50
Hodgkin-Lymphom	90–100

5 Kongenitales Immun-Defekt-Syndrom

Als letzten Fall zeige ich den 2½jährigen Knaben Jonathan, der als drittes Kind nicht verwandter, gesunder Eltern nach normaler Schwangerschaft komplikationslos geboren wurde. Ihr erstes Kind, geboren 1975, wurde im ersten Jahr BCG-geimpft, entwickelte bald eine progressive Entzündung und starb mit 4 Monaten unter dem Bild einer schweren Infektion. Nach einem Abort bekamen sie ein zweites gesund erscheinendes Kind, bei dem wir gleich nach der Geburt die Diagnose eines schweren kombinierten Immundefekts stellten. Die einzige damals verfügbare Therapie, die Transplantation von fötalem Thymus, war nur teilweise erfolgreich. Die Mutter pflegte das Kind allein in einem sauberen, jedoch nicht sterilen Raum. Das Kind gedieh gut, aber im Alter von 1¼ Jahren bekam es dann trotzdem Infektionen und kam, etwas älter zwar, auch ad exitum. Beim dritten Kind, bei Jonathan, mussten wir leider ebenfalls die Diagnose eines schweren kombinierten Immundefekts stellen. Wir stimulieren dazu isolierte Lymphozyten in vitro mit Antigenen und Mitogenen; da weder die T- noch die B-Zellen darauf reagierten, war damit die Diagnose in 3 Tagen gesichert.

Diese Krankheit möchte ich Ihnen hier kurz in Erinnerung rufen. 1952 entdeckte man Patienten, die keine Antikörper bilden und kein Gammaglobulin haben. Dem Defekt liegt eine kongenitale Störung der B-Zellen zugrunde, die keine Immunglobuline synthetisieren können. Bei einem dieser Entdecker, Charles A. Janeway, dem Chef des Kinderspitals in Boston, konnte ich 1955/56 arbeiten und die damals neu entwickelten Techniken erlernen. Als ich 1956 in die Schweiz zurückkehrte, fand ich bald 2 neue Patienten mit dieser Störung. Wir haben sie beide mit Gammaglobulin richtig behandelt, so dass ihre Gammaglobulin-Konzentration sich normalisierte, aber wider Erwarten ging es ihnen nicht besser, und beide kamen ad exitum.

Bei derartigen Enttäuschungen muss der Arzt nochmals zum Anfang zurück und alle Befunde, auf denen seine Diagnose beruhte, neu und kritisch

beurteilen. Beim genauen Betrachten der Verlaufskurve fiel uns auf, dass die Lymphozytenzahl immer sehr gering war; der Pathologe fand übereinstimmend das ganze lymphatische System schwer unterentwickelt. Damit war ein neues Krankheitsbild definiert (W. H. Hitzig et al., 1958), das damals während einiger Zeit als die «Schweizerische Form der Agammaglobulinämie» bezeichnet wurde. Heute heisst es «schwerer kombinierter Immundefekt», abgekürzt SCID (Tabelle 4). Es ist eine familiär auftretende Krankheit, die schon im frühen Säuglingsalter beginnt, während die Symptome einer isolierten Agammaglobulinämie erst im 2. Lebensjahr oder noch später bemerkbar werden. Weitere Merkmale sind ein nicht zu beherrschender Durchfall, ein intensiver Husten, der an Keuchhusten erinnert, und ein hartnäckiger Soorbefall. Etwa zur gleichen Zeit wurden auch in Bern 2 solche Fälle beschrieben. Aus vielen Familienbeobachtungen weiss man heute, dass die Vererbung sowohl autosomal-rezessiv als auch X-chromosomal sein kann.

Tabelle 4 Schweres kombiniertes Immundefektsyndrom

Table 4 Severe combined immunodeficiency syndrome = SCID

Klinik:
Vererbtes kongenitales Leiden:
Geschwister, Knaben und Mädchen befallen
Vererbung X-L und AR
Beginn im frühen Säuglingsalter (1.–6. Monat)
Therapie-resistente Diarrhö → schwere Dystrophie
Pertussoider Husten, Pneumopathie
Persistierender Candida-Befall der Haut und Schleimhäute
Morbilliforme Exantheme
Maligner Verlauf: Exitus im 1. Lebensjahr

Durch zahlreiche Untersuchungen und Überlegungen kam man zur Hypothese, dass diesen Patienten lymphoide Stammzellen fehlen, oder dass sie mindestens die frühen Vorläufer der Lymphozyten nicht bilden können. Wir müssten ihnen also, um sie wirksam zu behandeln, Stammzellen zuführen. Diese müssten sich zu T- und B-Lymphozyten differenzieren, welche die beim Patienten völlig leeren lymphoiden Organe besiedeln und aktivieren könnten. Als das für diese Ausreifung entscheidende Organ erkannte man den Thymus, der damals noch als «Organ ohne Funktion» betrachtet wurde. Die heutigen Studenten dagegen wissen, dass dem Thymus eine Schlüsselstellung zukommt, indem er – gewissermassen als Lehrstätte für die immunologischen Zellen – alle Immunfunktionen ausbildet. Die Stammzellen lernen dort, was körpereigen und was körperfremd ist.

Um unserem Patienten zu helfen, müsste man ihm also Stammzellen und Thymusgewebe implantieren, damit diese Stammzellen instruiert und angelernt werden können. Dementsprechend haben wir 1964 bei 2 Patienten fötalen Thymus und fötale Leber implantiert. Wir sahen auch tatsächlich eine vor-

übergehende Besserung mit deutlichem Ansteigen der Lymphozyten, aber keine Heilung, weil wir offensichtlich nicht genügend Stammzellen zuführen konnten. Im Jahr 1968 hat Good (R. A. Good et al., 1969) in Minneapolis durch eine Knochenmarktransplantation bedeutend grössere Zellmengen eingepflanzt und auf diese Weise einen Patienten völlig geheilt. Dieser ist jetzt 21 Jahre alt, völlig gesund, normal entwickelt, immunologisch kompetent und normal intelligent.

Das war also der richtige Weg. Zunächst konnte man aber nur Knochenmark von Geschwistern mit den gleichen HLA-Gruppen verwenden. Gerade diese Spender fehlten aber bei unserem Patienten, wie auch in den meisten anderen betroffenen Familien. Erst vor einigen Jahren wurde die Möglichkeit entwickelt, auch bei semikompatibler HLA-Konstellation zu transplantieren, indem man in mehreren Reinigungsschritten die reifen Lymphozyten entfernt und praktisch nur unreife Stammzellen transplantiert. So hat heute jeder Patient in seinen Eltern, die je eine Hälfte seines eigenen Erbgutes besitzen, je zwei potentielle Spender.

Im März 1987 konnten wir unseren Patienten Jonathan auf diese Art behandeln. Im Laufe von einigen Wochen normalisierten sich seine immunologischen Befunde, nur die Antikörperbildung blieb noch zu gering. Zu seinem Schutz injizieren wir ihm deswegen einmal pro Monat normales menschliches Gammaglobulin. – Die Mutter äussert sich dazu wie folgt:

«H: Wie geht es ihm jetzt?

M: Es geht ihm sehr gut. Ich finde auch, dass er sich sehr gut entwickelt.

H: Er ist normal gross, normal schwer, er spricht und bewegt sich altersentsprechend. – Hat er besonders viele Infektionen?

M: Nein.

H: Wir sind immer noch vorsichtig und behandeln ihn weiter mit Gammaglobulin, hoffen aber, dass sich alle Abwehrfunktionen im Laufe der Zeit ganz normalisieren werden.»

Der Weg ist für die Zukunft vorgezeichnet, und wir werden jeden Patienten transplantieren können.

Diese Krankheiten der Abwehrsysteme waren bis vor kurzem eine Spezialität, die kaum jemanden interessierte, ausser einem kleinen Klub von Pädiatern, die sich intensiv damit beschäftigten. Man fasste die Leiden als «Primäre Immundefekt-Syndrome» = PIDS zusammen. Davon abgeleitet ist AIDS, das «Acquired immunodeficiency syndrome», das 1981 als neue Krankheit auftauchte. Damit änderte sich die Einschätzung weitgehend: Das Interesse an Immundefekten ist heute gross und ist auch ausserhalb der Ärzteschaft in weiten Kreisen der Bevölkerung erwacht. Man sollte nicht vergessen, dass die diagnostischen Techniken auf Grund der Beobachtungen bei PIDS im Laufe der letzten 30 Jahre entwickelt worden waren; dadurch wurden die Voraussetzungen dazu geschaffen, dass die neue Krankheit AIDS innerhalb von 3 Jahren in ihrer Pathogenese und kurze Zeit darauf in der Ätiologie verstanden rden konnte.

Bild 4 Antike Statue des Asklepios mit seinem Diener Telesphoros.

Fig. 4 Antique statue of the god Asklepios with his servant Telesphoros.

Die neue Seuche AIDS hat mit Recht Schlagzeilen gemacht. Man glaubte anfangs der achtziger Jahre, dass die Medizin alle Infektionskrankheiten fest im Griff habe; dieser Glaube ist schwer erschüttert worden. Neben den logischem Denken zugänglichen medizinischen Fragen haben sich auch neue psychologische, soziologische, ethische und emotionale Probleme gestellt, die andere Perspektiven eröffnen. Dass AIDS eine einzigartige Krankheit sei, wie es von direkt Betroffenen oft dargestellt wird, kann allerdings nicht bestätigt werden, wenn man die Medizingeschichte etwas kennt. In früherer Zeit wurden die meisten Krankheiten als ein Schicksal empfunden, da man sie nicht wirksam behandeln konnte. Ein Heilmittel für Tuberkulose gab es vor 40 Jahren nicht, man konnte lediglich den Verlauf beobachten und verfolgen, und ähnliches gilt für alle andern Infektionskrankheiten. In diesem Stadium stehen wir heute beim AIDS. Die Forschungsanstrengungen sind aber so inten-

siv wie noch nie, so dass rasche Fortschritte und die Ausarbeitung einer wirksamen Therapie im Laufe der kommenden Jahre nicht als phantastisch anzusehen sind.

Die Weiterführung dieser immunologischen Arbeiten liegt in der Hand meines Oberarztes Reinhard Seger. Er ist zur Zeit Leiter unseres immunologischen Labors und hat selber schon wesentliche Arbeiten durchgeführt (Prof. Seger wurde unterdessen vom Regierungsrat auf den 15. Oktober 1989 zum Extraordinarius und zu meinem Nachfolger gewählt).

Abschliessend kann ich feststellen, dass die Technik uns in der Medizin zwar sehr viel gebracht hat und dass wir noch sehr viel von ihr erwarten. Wir sollten in der klinischen Medizin ihre Rolle aber nicht masslos überschätzen. Zur Beibehaltung der richtigen Proportionen kann uns eine antike Statue des Asklepios, des Gottes der Heilkunde, dienen, der von seinem Diener Telesphoros begleitet ist (Bild 4); dieser ist kaum halb so gross und durch seine Kapuze als der Techniker gekennzeichnet, der Asklepios die manuellen Arbeiten abnimmt. Zweifellos sehen wir Telesphoros heute sehr viel grösser, denn niemand wird bestreiten, dass die Technik wichtiger geworden ist. Aber auch in Zukunft sollte sie uns nicht über den Kopf wachsen, sondern im Dienste des Klinikers am richtigen Ort eingesetzt werden. Wir Ärzte unsererseits müssen uns immer als Diener und Helfer unserer Patienten sehen, getreu dem alten Leitspruch «Salus aegroti suprema lex».

Wenn es mir gelungen sein sollte, meinen Studenten etwas vom feu sacré, das Guido Fanconi uns vorgelebt hat, weiterzugeben, und seinen therapeutischen Optimismus ebenso wie seine wissenschaftliche Neugier in die Zukunft weiterzutragen, würde ich meine Aufgabe als erfüllt ansehen.

6 Literatur

Good, R.A., R.A. Gatti, R. Hong, H.J. Meuwissen (1969), Graft treatment of immunological deficiency, Lancet I, 1162–1164.

Hitzig, W.H., Z. Biro, H. Bosch, H.J. Huser (1958), Agammaglobulinämie und Alymphozytose mit Schwund des lymphatischen Gewebes. Helv. paed. Acta *13*, 551–585.

Hitzig, W.H., P.G. Frick, K. Betke, T.H.J. Huisman (1961), Hämoglobin Zürich, eine neue Hämoglobin-Anomalie mit sulfonamid-induzierter Innenkörperanämie. Helv. paed. Acta *15*, 499–514.

Irmiger, J.-C., E.J. Schoenle, J. Briner, R.E. Humbel (1989), Structural alteration of the insulin-like growth factor II-gene in Wilms tumour. Eur. J. Paediatr. *148*, 620–623.

Moroni, Chr. (1989), Onkogene und Anti-Onkogene. Neue Zürcher Zeitung vom 6. Dezember, Nr. 284, Seite 69.

Stauffer, U. G. (1961), Familien-Untersuchung der Hämoglobin Zürich-Sippe. Helv. paed. Acta *16*, 226–243.

Weitere Spezialliteratur kann beim Autor angefordert werden.

Prof. Dr. med. W.H. Hitzig, Bergstrasse 65, 8032 Zürich.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/2*: 89–96

Der Vektornematode *Xiphinema diversicaudatum* und das Arabismosaikvirus der Erdbeere im Schweizer Mittelland [1]

. Klingler, P. Kunz und A. Buser, Wädenswil

Die Verbreitung von *X. diversicaudatum* in der Schweiz wird anhand einer neuen Karte dargestellt. Sie zeigt den Stand bis Ende 1989. Gegenüber früheren Karten sind weitere Fundorte hinzugekommen, das bisherige Verbreitungsmuster bleibt jedoch grundsätzlich unverändert. Die Ostschweiz östlich von Walensee – Zürichsee – Limmattal (nach Sturhan auch der angrenzende süddeutsche Raum) bleibt nach wie vor ohne Funde; solche konnten ausschliesslich westlich der genannten Achse registriert werden. Eine früher formulierte Hypothese über mögliche geologische und pedologische Ursachen für dieses Verbreitungsmuster wird deshalb aufrechterhalten.

Das Auftreten des Arabismosaikvirus, welches durch *X. diversicaudatum* übertragen wird, steht in enger Beziehung zur Abundanz dieses Vektors. Bei Populationen von über 400 Nematoden pro Liter Erde konnte das Virus immer, bei Dichten unter 100 dagegen nie nachgewiesen werden. Im Zwischenbereich gab es positive wie auch negative Befunde. Geographische Schwerpunkte des AMV-Auftretens können der Verbreitungskarte entnommen werden. Die dargelegten Beziehungen ermöglichen eine Prognose über die Gefährdung von Erdbeerkulturen durch das Arabismosaikvirus in Böden, in denen der Vektornematode vorkommt.

Das Auftreten des Vektornematoden seinerseits steht in Beziehung zu den Bodeneigenschaften. Es beschränkte sich in allen unseren Untersuchungen auf deutlich saure bis neutrale Böden. Unter den Bodentypen verzeichnen «sandiger Lehm» und – weniger häufig – «Lehm» die meisten Funde.

The Vector Nematode *Xiphinema diversicaudatum* and the Arabis Mosaic Virus of Strawberries on the Swiss Plateau

The distribution of *X. diversicaudatum* in Switzerland is shown in a map (figure). Compared with earlier maps new finds have been added, but the known geographical distribution pattern remains unchanged: East of the Walensee and Zürichsee basins and of the Limmat valley, Switzerland remains void of any finds of this species. According to Sturhan, the same is true for the adjacent south German area.*X. diversicaudatum* has been found west of the just mentioned geographical axis exclusively. The hypothesis therefore is maintained that this species is not occurring in soils originating from deposits of the eastern Alps which are rich in chalk, whereas it occurs in soils derived from deposits of the central and western Alps, which are rich in silicates.

The occurrence of the arabis mosaic virus (AMV), which is vectored by *X. diversicaudatum*, is strongly related to the abundance of the vector. The virus has always been found if populations exceeded 400 nematodes per liter of soil; it has never been detected in places where vector densities were below 100. In between, the virus has sometimes been found and sometimes not been found (table). These relations enable prognoses to be made regarding the risk run by strawberry plantations to be damaged by the arabis mosaic virus.

The occurrence of *X. diversicaudatum* is related to soil parameters. It was confined to clearly acid to neutral soils. Among the soil types, most findings were made in sandy loam and – less frequently – in loam.

[1] Wir danken Dr. F. Jäggli, Reckenholz, bestens für die Korngrössenanalysen der Böden zur Bestimmung der Bodenarten und Frau S. Spycher für ihre Hilfe bei der Nematodenextraktion und dem ELISA-Verfahren.

1. Einleitung

Über die Verbreitung von *Xiphinema diversicaudatum* in der Schweiz wurde bereits früher berichtet (J. Klingler et al., 1983; J. Klingler & R. Vallotton, 1985). Die vorliegende Arbeit ergänzt die Verbreitungskarte für *X. diversicaudatum* (X. d.) mit einigen neuen Fundstellen, vor allem vermittelt sie aber erstmals Untersuchungsergebnisse über das Vorkommen des Arabismosaikvirus (AMV), welches durch eben diesen Nematoden übertragen wird (A. Jha & A. F. Posnette, 1959; B. D. Harrison & C. H. Cadman, 1959). Untersucht werden weiter die Beziehung zwischen dem Auftreten von AMV und der Abundanz des Vektornematoden einerseits sowie der Einfluss einiger Bodenparameter auf das Vorkommen dieses Nematoden andererseits.

Das Interesse an der Durchführung dieser Untersuchung wurde hervorgerufen durch die Beobachtung, dass in einigen Gegenden Erdbeerfelder durch das Arabismosaikvirus geschädigt werden. Neben anderen Orten wurden besonders im Bereich des Emmentals und angrenzenden Gebieten AMV-Befallsherde und hohe Populationen von *X. diversicaudatum* festgestellt. Es war auch aus diesem Gebiet, dass das Auftreten von AMV-Befall an Erdbeeren in der Schweiz erstmals beschrieben wurde (J. Klingler & P. Kunz, 1978). Das Vorkommen dieser nematodenübertragenen Viruskrankheit hat hier besonders unerfreuliche Auswirkungen, weil es die notwendigen Zusatzeinkünfte von Emmentaler Bauern aus dem Erdbeeranbau gefährdet.

2. Stichprobenentnahme, Material und Methoden

Die untersuchten Stichproben stammen einerseits von Orten, die uns wegen vermuteter Schäden an Erdbeeren gemeldet wurden, andererseits von Orten, an denen uns aufgrund der früheren Arbeiten das Vorkommen von *X. diversicaudatum* bereits bekannt war. Jede Stichprobe bestand aus zwei Teilen: a) aus Erde zwecks Extraktion und Auszählung des Vektornematoden, und b) aus Pflanzen im Bereich der Stichprobenstelle, welche Wirtspflanzen des AMV sind [Erdbeeren, Weissklee *(Trifolium repens)*, Gänseblümchen *(Bellis perennis)* und Blacke *(Rumex obtusifolius)*]. Diese Pflanzen dienten zum Nachweis des AMV mittels dem ELISA-Verfahren. Die drei letztgenannten Arten sind verbreitet vorkommende, mehrjährige Pflanzen, deren Wirtseignung für das AMV von uns selbst festgestellt wurde, bzw. bereits aus der Literatur bekannt ist (M. Klinkowski, 1977): Sie eignen sich deshalb als Testpflanzen bei Abwesenheit der Erdbeeren.

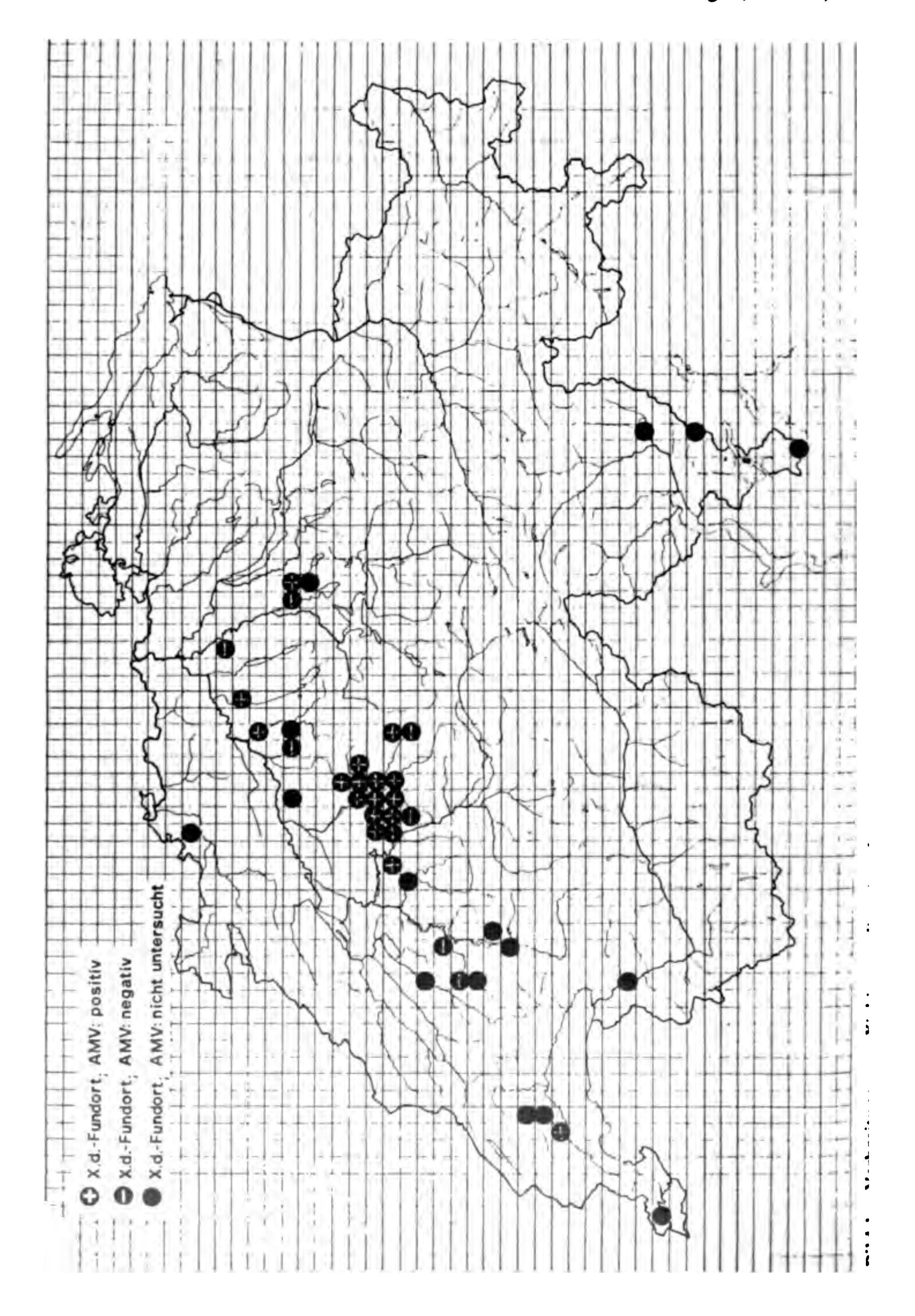
An einem Erhebungsort wurde meist an mehreren Stellen Erde (bis ca. 25 cm tief) und Pflanzen entnommen und zu einer Mischprobe zusammengefasst. Die Extraktion von X.d. aus der Erde wurde nach der durch W.A. Coolen und C.J. d'Herde (1977) modifizierten Methode von A.T. de Grisse (1969) vorgenommen, bei welcher im zweiten Zentrifugationsschritt statt der

Zuckerlösung eine kolloidale Siliziumlösung («Ludox») verwendet wird. Die in der Tabelle enthaltenen Zahlen basieren somit auf dieser Methode. Der Nachweis des AMV geschah mittels einem serologischen Testprinzip. Das Verfahren trägt die Kurzbezeichnung «ELISA», für Enzyme Linked Immunosorbent Assay (M.F. Clark et al., 1976 a+b). Das Prinzip ist von mehreren Autoren beschrieben worden (z.B. R. Casper und S. Meyer, 1981), und beruht auf der Reaktion von virusspezifischen Antikörpern gegenüber den Virusantigenen. Das AMV-Antiserum wurde von der Firma Bioreba AG, Basel, bezogen.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Verbreitung von *X. diversicaudatum:*

Die Abbildung gibt den Stand bis Ende 1989 wieder. Gegenüber unseren früheren Verbreitungskarten sind einige neue Funde hinzugekommen. Nicht immer wirkt sich dies in einem zusätzlichen Punkt auf der Karte aus, da ein neuer Fundort in einem bereits markierten 5-km-Quadrat liegen kann. Aus Bild 1 ist ersichtlich, dass die gesamte Ostschweiz östlich der Linie Walensee – Zürichsee – Limmattal auch weiterhin keine Funde von X.d. aufweist, obwohl in diesem Gebiet ein verbreiteter Erdbeeranbau besteht und auch weitere Proben auf Nematoden untersucht wurden. Am Verbreitungsmuster von X.d. in der Schweiz hat sich somit seit unseren früheren Erhebungen grundsätzlich nichts geändert. Das heisst, die Art wurde weiterhin nur westlich der genannten Linie gefunden, nicht aber östlich davon, in der Ostschweiz. Auch im angrenzenden süddeutschen Raum, südlich der Donau, sind noch immer keine X.d.-Funde gemacht worden, obgleich dort andere *Xiphinema*-Arten registriert werden konnten (D. Sturhan, in lit., 1989). Ins gleiche Bild würde passen, wenn X.d. auch im österreichischen Vorarlberg fehlte, was wir denn auch vermuten (J. Klingler et al., 1983). Nun haben aber D.J.F. Brown und C.E. Taylor (1987) in Bild 1 ihrer Publikation einen Fund dieser Art im vorarlbergisch-schweizerischen Grenzgebiet markiert, welcher H. Franz (1942) zugeschrieben wird. Eine Konsultation von dessen Arbeit hat jedoch ergeben, dass der eingetragene Fund keinesfalls am markierten Ort, sondern weit östlich bei Admont liegen müsste, wenn es sich dabei überhaupt um X.d. gehandelt hat, was D. Sturhan (1963) ursprünglich für möglich hielt, heute aber in Frage stellt (D. Sturhan, in lit., 1989). Somit gilt unsere frühere Arbeitshypothese, wonach X.d. in der Ostschweiz, dem angrenzenden süddeutschen Raum und wahrscheinlich auch im – bisher nicht untersuchten – Vorarlberg als nicht vorkommend eingestuft werden kann, nach wie vor (J. Klingler et al., 1983). Geologische und bodenkundliche Aspekte, die eine mögliche Erklärung für diese Hypothese abgeben, wurden in der eben zitierten Arbeit erläutert.


X.d.-Fundort, AMV: positiv
X.d.-Fundort, AMV: negativ
X.d.-Fundort, AMV: nicht untersucht

Auftreten des Arabismosaikvirus:

Plus- und Minuszeichen (+, –) in der Abbildung verweisen auf einen po-
:n bzw. negativen AMV-Nachweis innerhalb eines 5-km-Koordinaten-
lrates. Schwarze Punkte ohne ein solches Zeichen markieren Standorte,
enen zwar X.d. gefunden, aber kein Virustest gemacht wurde. Liegen aus
m 5-km-Quadrat sowohl positive wie negative Nachweise vor, so wurde
:s mit einem Pluszeichen markiert. Die grosse Häufigkeit des Auftretens
Viruskrankheit im Emmental ist unübersehbar. Sie fällt mit einer in die-
Bereich ebenfalls hohen Frequenz und Abundanz (Tabelle) des Vektor-
atoden zusammen. Der am Genfersee (bei Allaman) gelegene Fundort
X. diversicaudatum und Arabismosaikvirus entstammt einer Literaturan-
: (R. Bovey et al., 1980). Dieser Fundort liegt in einem Rebberg und ist un-
; Wissens der einzige bekannte AMV-Befall an Reben in der Schweiz.
us der Tabelle 1 können Beziehungen zwischen dem Auftreten des Vek-
ematoden und des Arabismosaikvirus ersehen werden. Bei hohen X.d.-
ılationen war der AMV-Nachweis an Pflanzen der Probeentnahmestelle
er positiv, bei niederen Populationen war dieser Nachweis immer negativ
in einem mittleren Populationsbereich hielten sich positive und negative
ıltate etwa die Waage. Etwas präziser formuliert: bei Abundanzen des
ornematoden von über 400 je Liter Erde war das Arabismosaikvirus im-
nachzuweisen (n = 13); bei Abundanzen unter 100 dagegen nie (n = 14).
Zwischenbereich (100 bis 400 X.d./1 Erde) standen positive und negative
hweise in einem relativ ausgeglichenen Verhältnis (n = 10; davon 6 posi-
ınd 4 negativ). Mit dieser exakten Erhebung wird der im Laufe früherer
beobachtungen gewonnene Eindruck über enge Beziehungen zwischen
ndanz des Vektors und Auftreten von AMV-Schäden an Erdbeeren quan-
iv belegt. Diese Resultate sind pflanzenbaulich insofern von Bedeutung,
ufgrund der Höhe der im Boden vorhandenen X.d.-Population eine gute
;nose über die Gefährdung von Erdbeerkulturen durch AMV ermöglicht
. Die Tatsache, dass die AMV-Krankheit der Erdbeere erst bei relativ ho-
Vektorabundanz in Erscheinung tritt, deutet im übrigen darauf hin, dass
. kein sehr effizienter Vektor dieser Krankheit ist.
)ie Tabelle 1 zeigt auch Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von
. und den Bodeneigenschaften. Der Nematode wurde fast ausschliesslich
ıuren, nur selten in neutralen, nie aber in alkalischen Böden gefunden, ob-
l auch aus solchen viele Stichprobenuntersuchungen vorliegen. Diese Be-
ugung saurer Böden deckt sich mit unseren früheren Beobachtungen (J.
gler, 1983; 1984) und jenen spanischer Kollegen (A. Navas et al., 1988).
ter ist aus der Tabelle ersichtlich, dass der Bodentyp «sandiger Lehm»
em Nematoden einen offenbar günstigen Lebensraum bietet. Er kommt
, wie wir selber und andere (z.B. C.E. Taylor und D.J.F. Brown, 1976)
;estellt haben, auch in Lehmböden vor. Die Bezeichnung der Bodentypen
er Tabelle erfolgte nach der Klassierung von A. Kaufmann und P. Rod
)).

Tabelle 1 Abundanz von *X. diversicaudatum* in Beziehung zum Auftreten des Arabismosai virus, zum pH und zum Bodentyp.

Table 1 Abundance of *X. diversicaudatum* in relation to the occurrence of the arabis mosa virus, to the pH and to the soil type.

Ort und Koordination	Zahl X.div. je l Erde	AMV-Test (ELISA)	pH	Boden-typ	Kulturpflanze, Bemerkungen
Liebefeld BE 598625/197575	1845	+	6.3	sL	Wiese
Landiswil BE 618850/200600	1120	+	4.9	sL	Erdbeeren, geschädigt[1]
Schlosswil BE 612600/195300	1000	+	5.6	sL	Erdbeeren, geschädigt
Bigenthal BE 615400/201600	840	+	5.3	L	Erdbeeren, geschädigt
Landiswil BE 619000/201300	820	+	5.0	sL	Erdbeeren, geschädigt
Sumiswald BE 625550/207900	735	+	5.6	L	Erdbeeren, geschädigt
Landiswil BE 619400/199000	730	+	4.5	L	Erdbeeren, geschädigt
Lützelflüh BE 619500/207100	690	+	5.0	sL	Erdbeeren, geschädigt
Allenwinden ZG 683625/225025	675	+	6.2	L	Kirschbäume, Grasunterwuch
Holziken AG 645800/242000	600	+	6.0	sL–L	Erdbeeren, geschädigt
Rüderswil BE 620700/202000	425	+	5.1	sL	Erdbeeren (Einsendung)
Zofingen AG 638.../237500	420	+	6.2	sL	Wiese, früher Erdbeeren
Biembach BE 612450/204400	408	+	4.7	sL	Erdbeeren, geschädigt
Langnau BE 624350/199900	312	+	6.1	sL	Wiese, nach Erdbeeren
Chésopelloz FR 571700/184100	310	–	6.1	sL	Obstbäume, Grasunterwuchs
Stettlen BE 607350/202600	295	+	6.2	sL	Erdbeeren, geschädigt
Lauperswil BE 623200/201150	260	–	5.3	sL	Erdbeeren
Dürrenroth BE 624975/212600	220	+	6.4	sL	Wiese
Zug ZG 682500/225250	216	+	5.8	sL	Obstbäume, Grasstreifen
[illegible]genthal BE [illegible]50/201850	215	–	6.1	sL	Erdbeeren, Wiese

tion	Zahl X.div. je l Erde	AMV-Test (ELISA)	pH	Boden-typ	Kulturpflanze, Bemerkungen
wil BE 201150	160	+	5.7	sL	Wiese
R 178900	120	–	5.9	sL	Wiese
matt LU 196700	100[2]	+	5.5	sL	Erdbeeren, geschädigt
LU 192425	98	–	4.5	L	Erdbeeren
BE 204450	88	–	5.1	sL	Erdbeeren
erg ZG 225500	60	–	5.3	L	Obstbäume, Grasstreifen
ı BE 199900	60	–	5.1	sL	Erdbeeren
wil LU 229250	60	–	6.0	sL	Kirschbäume, Grasunterwuchs
BE 204600	48	–	5.2	L	Erdbeeren
ingen BE 190650	44	–	6.0	sL	Wiese
FR 180300	43	–	5.9	sL	Wiese
ht BE 195650	28	–	7.0	sL	Wiese
BE 204200	20	–	5.1	sL	Erdbeeren
dbach BE 200800	15	–	6.3	sL	Erdbeeren
ingen BE 190650	10	–	4.6	sL	Erdbeeren
il AG 247700	8	–	5.9	sL	Obstbäume, Grasunterwuchs
ZG 228550	4	–	6.2	L	Obstbäume, Grasunterwuchs

geschädigt» sind Schäden durch das Arabismosaikvirus zu verstehen
erer, vermutlich zu niedriger Wert (andere Extraktionsmethode)
itiver AMV-Test –= negativer AMV-Test sL sandiger Lehm L Lehmboden

4 Literatur

Bovey, R., Gärtel, W., Hewitt, W.B., Martelli, G.P. und Vuittenez, A. (1980). Virus and virus-like diseases of grapevines. Payot, Lausanne; La Maison Rustique, Paris; E. Ulmer, Stuttgart. 181 pp.

Brown, D.J.F. and Taylor, C.E. (1987). Comments on the occurrence and geographical distribution of longidorid nematodes in Europe and the mediterranean region. Nematol. medit. *15*, 333–373.

Casper, R. und Meyer, S. (1981). Die Anwendung des ELISA-Verfahrens zum Nachweis pflanzenpathogener Viren. Nachrichtenbl. Deutsch. Pflanzenschutzd. *33* (2), 49–54.

Clark, M.F., Adams, A.N. and Barbara, D.J. (1976). The detection of plant viruses by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). Acta Horticulturae *67*, 43–45.

Clark, M.F., Adams, A.N., Tresh, J.M. and Casper, R. (1976). The detection of plum pox and other viruses in woody plants by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). Acta Horticulturae *67*, 51–57.

Coolen, W.A. und d'Herde, C.J. (1977). Extraction de *Longidorus* et *Xiphinema spp.* du sol par centrifugation en utilisant du silice colloïdale. Nematol. mediterr. *5*, 195–206.

de Grisse, A.T. (1969). Rédescription ou modifications de quelques techniques utilisées dans l'étude des nématodes phytoparasitaires. Meded. Rijksfac. Landb. Wet. Gent, *34*, 351–369.

Franz, H. (1942). Untersuchungen über die Kleintierwelt ostalpiner Böden. I. Die freilebenden Erdnematoden. Zool. Jahrb., (Systematik), Bd. *75*, 365–546.

Harrison, B. D. and Cadman, C.H. (1959). Rolė of a dagger nematode *(Xiphinema sp.)* in outbreaks of plant disease caused by arabis mosaic virus. Nature *184*, 1624–1626.

Iha, A. und Posnette, A.F. (1959). Transmission of a virus to strawberry plants by a nematode. Nature *184*, 962–963.

Kaufmann, A. und Rod, P. (1979). Grundlagen für die Anwendung der Körnungsanalyse in der Landwirtschaft. Bodenkundl. Ges. Schweiz, Bull. Nr. 3, 86–88.

Klingler, J. und Kunz, P. (1978). Beobachtungen und Versuche mit wurzelparasitischen und virusübertragenden Nematoden an Erdbeeren. Schweiz. Z. Obst- und Weinbau, *114*, 342–350.

Klingler, J., Güntzel, O. und Kunz, P. (1983). *Xiphinema*- und *Longidorus*-Arten (Nematoda) im schweizerischen Mittelland. Viertelj.schrift Naturforsch. Ges. Zürich, *128*, 89–114.

Klingler, J. (1984). Ecological Factors affecting the distribution of some *Xiphinema* and *Longidorus* species. Proc. First Int. Congr. Nematology, Guelph, Ont., Canada, 44–45.

Klingler, J. und Vallotton, R. (1985). Distribution of *Longidoridae* and *Xiphinemidae*. in: Prov. Atlas of Plant Parasitic Nematodes of Switzerland, ed. by T.J.W. Alphey, SCRI, Dundee, 34 pp.

Klinkowski, M., 1977. Pflanzliche Virologie. Bd. 4: Die Virosen an Zierpflanzen, Gehölzen und Wildpflanzen in Europa. Akademie-Verlag, Berlin, 337 pp.

Navas, A., Bello, A. und Arias, M. (1988). Ecology and potential distribution of *Xiphinema diversicaudatum* and *X. pachtaicum* (Nematoda: *Longidoridae*) in continental Spain. Nematologica *34*, 314–330.

Sturhan, D. (1963). Beitrag zur Systematik der Gattung *Xiphinema* Cobb 1913. Nematologica *9*, 205–214.

Taylor, C.E. and Brown, D.J.F. (1976). The geographical distribution of *Xiphinema* and *Longidorus* nematodes in the British Isles and Ireland. Ann. appl. Biol. *84*, 383–402.

…und P. Kunz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, …swil. A. Buser, Holdenweg 7, Ch-4435 Niederdorf

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135*/2: 97–116

Das Geobotanische Institut an der ETHZ, Stiftung Rübel

Elias Landolt, Frank Klötzli, Krystyna Urbanska, Andreas Gigon, Egon Horak und Matthias Baltisberger, ETH Zürich

1 Geschichte

Das Wort Geobotanik kommt vom griechischen Geos (= Erde, Umwelt) und Botanik (= Lehre von den Pflanzen) und bezeichnet die Wissenschaft von den pflanzlichen Organismen und ihren Beziehungen zur Umwelt im weitesten Sinne. Je nachdem, ob die Umwelt als Zeit, als Raum oder als Standort (Gesamtheit der an einem Ort wirkenden Umweltfaktoren) verstanden wird, sprechen wir von historischer Geobotanik (Pflanzengeschichte), chorologischer Geobotanik (Pflanzengeographie) oder ökologischer Geobotanik (Pflanzenökologie).

Eduard August Rübel (1876–1960) (Bild 1), der ursprünglich Chemie studierte, sich aber von Carl Schröter, Professor für spezielle Botanik an der ETH, für Botanik begeistern liess und an der ETH von 1917–1934 als Privatdozent (seit 1923 als Titularprofessor) wirkte, errichtete 1918 aus seiner wis-

Bild 1 Eduard August Rübel (Gründer des Institutes)

Fig. 1 Eduard August Rübel (Founder of the Institute)

senschaftlichen Bibliothek, aus dem Herbar und der Instrumentensammlung und einem Stiftungskapital eine öffentliche Stiftung «Geobotanisches Institut Rübel», der 1928 von seinen beiden Schwestern Helene und Cécile Rübel das neu erbaute, heute noch bestehende Institutsgebäude an der Zürichbergstrasse 38 (Bild 2) geschenkt wurde. Rübel blieb Direktor des Institutes bis 1929 und überwachte später als Oberleiter die Tätigkeit des Institutes, bis er es 1958 als Stiftung Rübel der ETH schenkte. Nach einer kurzen Zwischenzeit von Heinrich Brockmann-Jerosch (1929–1931) war Werner Lüdi (Bild 3) ab 1931 bis 1958 Direktor des Institutes. Auf die Übernahme des Institutes durch die ETH erfolgte 1958 die Wahl von Heinz Ellenberg (Bild 4) zum Professor für Geobotanik an der ETH und Leiter des Institutes. Ellenberg folgte 1966 einem Ruf nach Göttingen und wurde durch Elias Landolt, damals Professor für Pflanzensystematik am Institut für spezielle Botanik der ETH, abgelöst. Von den in Bild 5 erwähnten, am Institut tätigen Wissenschaftern gründete Braun-Blanquet in Montpellier die weltbekannte Station Internationale de

Bild 2 Das Institutsgebäude von 1928 an der Zürichbergstrasse von Osten (rechts). Im Vordergrund erkennt man eine treppenartige Grundwasserbeckenanlage mit automatischer Bedeckung bei Niederschlägen, dahinter den Labortrakt mit Gewächshaus von 1966.

Fig. 2 The Institute building from 1928 at the Zürichberg Street from the East (to the right). In the foreground a stepped construction of groundwater basins can be seen. They get covered automatically by a moving roof when rain begins. Behind the basins there is the laboratory building of 1966.

Bild 3 Werner Lüdi (1931–1958 Direktor des Institutes)

Fig. 3 Werner Lüdi (Director of the Institute from 1931 to 1958)

Bild 4 Heinz Ellenberg (1958–1966 Direktor des Institutes)

Fig. 4 Heinz Ellenberg (Director of the Institute from 1958 to 1966)

Géobotanique Méditerranéenne et Alpine (SIGMA), Vareschi wurde nach mehreren Zwischenstationen Botanikprofessor in Caracas, Venezuela, Stüssi wirkte als Konservator am botanischen Garten der Universität Zürich, Zoller leitete zuletzt als Professor die Botanische Anstalt der Universität Basel, v. Rochow heiratete den Botanikprofessor P. Villaret in Lausanne, und Rehder ist Botanikprofessor an der TU München.

Leiter	Mitarbeiter
Eduard Rübel (1876-1960) 1918-1928	Josias Braun-Blanquet (1884-1980) 1915-1926
Heinrich Brockmann (1879-1939) 1929-1931	Volkmar Vareschi (*1906) 1932-1936
Werner Lüdi (1888-1968) 1931-1958	Balthasar Stüssi (*1908) 1936-1944
Heinz Ellenberg (1913*) 1958-1966	Heinrich Zoller (1923*) 1945-1954
Elias Landolt (1926*) seit 1966	Margita von Rochow (1921-1974) 1954-1956
	Helmut Rehder 1958-1962
	Frank Klötzli (1934*) seit 1959
	Andreas Gigon (1942*) seit 1966
	Krystyna Urbanska (1935*) seit 1969

Bild 5 Vorsteher und langjährige Mitarbeiter des Institutes

Fig. 5 Directors and collaborators of many years of the Institute

Die Stiftung hatte zum Ziel, die geobotanische Wissenschaft zu fördern und den freien Meinungsaustausch zwischen den miteinander sonst kaum in Kontakt tretenden botanischen Instituten der beiden Zürcher Hochschulen und zwischen verschiedenen geobotanischen Schulen in Europa und der übrigen Welt zu ermöglichen. Rübel schuf dazu bereits 1917 das «Freie Geobotanische Kolloquium», das dem Institut angegliedert wurde, heute noch

besteht und abwechslungsweise vom Geobotanischen Institut ETH und vom Institut für systematische Botanik der Universität organisiert wird; ferner werden vom Institut regelmässig die «Internationalen Pflanzengeographischen Exkursionen» veranstaltet, die Wissenschafter aus verschiedenen Ländern in ausgewählten Gegenden zusammenführen, wo an konkreten Beispielen aktuelle Probleme der Geobotanik diskutiert werden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Exkursionen werden regelmässig in Bandform veröffentlicht. Rübel veranlasste für sein Institut zwei Reihen von wissenschaftlichen Publikationen, die Reihe «Bericht über das Geobotanische Forschungsinstitut Rübel in Zürich», ab 1958 «Berichte des Geobotanischen Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Stiftung Rübel» genannt, und die «Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes Rübel in Zürich», ab 1958 «Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich». Die «Berichte», die im allgemeinen ein Kalenderjahr umfassen und 1990 die Nummer 56 erreichen, enthalten neben dem Jahresbericht wissenschaftliche Beiträge von Institutsangehörigen oder eng mit dem Institut zusammenarbeitenden Wissenschaftern. Die «Veröffentlichungen», die bis Ende 1989 103 Bände umfassten, enthalten Einzelarbeiten (meist Dissertationen) oder mehrere Arbeiten über ein gemeinsames Thema. Durch den Versand und Tausch dieser Publikationen in alle Welt wurde das Institut rasch über die ganze Erde bekannt und konnte sich auch eine der besten geobotanischen Bibliotheken der Welt aufbauen. Von der Forschung des Geobotanischen Institutes zwischen 1918 und 1958 sind die folgenden wichtigeren Ergebnisse zu erwähnen: «Die Pflanzengesellschaften der Erde» (E. Rübel, 1930), «Flora von Graubünden» (J. Braun-Blanquet und E. Rübel, 1932–1935), «Die Buchenwälder Europas» (E. Rübel, 1932), Vegetationskarte der Erde (H. Brockmann-Jerosch, 1935), quartärbotanische Untersuchungen in der Schweiz (verschiedene Arbeiten durch W. Lüdi), «Die Pflanzengesellschaften der Schinigeplatte bei Interlaken und ihre Beziehungen zur Umwelt – eine vergleichend ökologische Untersuchung (W. Lüdi, 1948) sowie zahlreiche Beschreibungen und naturschützerische Gutachten über Moore der Schweiz (W. Lüdi). Während bei Lüdi neben pflanzenökologischen auch pflanzengeographische und vor allem paläobotanische (pollenanalytische) Arbeiten durchgeführt wurden, konzentrierte sich Ellenberg in erster Linie auf Pflanzenökologie. Er baute die Standortmessungen (Klima- und Bodenuntersuchungen) aus, förderte die Bioindikation mit Pflanzen und veranlasste auch experimentelle Arbeiten zur Konkurrenz. Mit dem am Geobotanischen Institut entstandenen und 1963 erstmals publizierten Lehr- und Nachschlagewerk «Die Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen» wurde Ellenberg weit über sein engeres Fachgebiet hinaus bekannt. Landolt hat gemeinsam mit Hans Hess, Professor für Pflanzensystematik am Institut für spezielle Botanik ETH, der 1980 ebenfalls an das Geobotanische Institut übertrat, und mit der Zeichnerin Rosmarie Hirzel 1967–1972 die grosse dreibändige «Flora der Schweiz und angrenzender Gebiete» veröffentlicht. 1972

erschien das Buch «Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz» (H. Ellenberg und F. Klötzli).

Neben der institutseigenen Forschung ist besonders die Förderung der geobotanischen Forschung ausserhalb der Institute zu erwähnen. Viele Wissenschafter wurden nicht nur in ihren Projekten von der Stiftung finanziell unterstützt, sondern es wurde ihnen auch die Veröffentlichung der Resultate in den institutseigenen Publikationen ermöglicht.

Bei der Übergabe des Institutes an die ETH umfasste die Stiftung neben der Bibliothek, dem Herbarium (ca. 100000 Bogen von Pflanzen, vorwiegend aus Mitteleuropa und dem mediterranen Raum) das 4stöckige Gebäude, das Grundstück von 1617 m² und einen Wertschriftenbestand von 1,2 Millionen Franken.

2 Organisation und Aufgaben

Mit der Übernahme des Institutes durch die ETH im Jahre 1958 erhielt das Institut auch Lehraufgaben, 1958/59 insgesamt 3 Wochensemesterstunden Vorlesung und 4 Stunden Übungen. 1980 ist bei der Auflösung des Institutes für spezielle Botanik die Gruppe Systematik der Phanerogamen (mit Prof. Hans E. Hess, der nach seinem Rücktritt 1987 nicht mehr ersetzt wurde) und das Phanerogamen- und Kryptogamenherbar der ETH hinzugekommen. Obwohl die Lehrbeanspruchung seither etwa 15mal grösser ist (ca. 40 Stunden Vorlesungen und 100 Stunden Übungen), ist dem Institut wie 1958 nur eine einzige Professur zugeteilt, und der grösste Teil des Unterrichtes muss im Lehrauftrag erteilt werden. Die Lehraufgaben des Institutes umfassen den Unterricht in systematischer Botanik, Vegetationskunde, Pflanzenökologie und Naturschutz sowie teilweise Mykologie an den Abteilungen für Pharmazie, Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Kulturtechnik und Vermessung, Biologie, Umweltnaturwissenschaften und Erdwissenschaften. Auch viele Biologie- und Geographiestudenten der Universität besuchen die Veranstaltungen des Geobotanischen Institutes.

Neben der Lehre und Forschung übernimmt das Institut auch Dienstleistungen (Pflanzenbestimmen, ökologische und Naturschutz-Gutachten, Vegetationskartierungen (z.T. im Auftrag), Erstellen von Listen geschützter Pflanzen und roten Listen (mit illustrierten Publikationen) usw. und hat verschiedene lehrbuchartige Bücher veröffentlicht, z.B. «Unsere Alpenflora» [illegible] Neubearbeitung 1984), «Ökosysteme» (F. Klötzli, Neubearbeitung [illegible] Lehrbuch «Grundlage der Pflanzenpopulationsbiologie» [illegible] veröffentlicht werden.

[illegible] aus einem gewählten Professor, aus [illegible] Forschungsgruppe leiten, aus 4 Oberassistenten oder [illegible] der ETH sowie 5 Biologiediplomanden [illegible] angestellten wissenschaftlichen Mitarbei-

tern und zahlreichen Hilfsassistenten und wenigen privatwirtschaftlich bezahlten Stellen. Einige der Mitarbeiter sind in Bild 6 zusammengestellt.

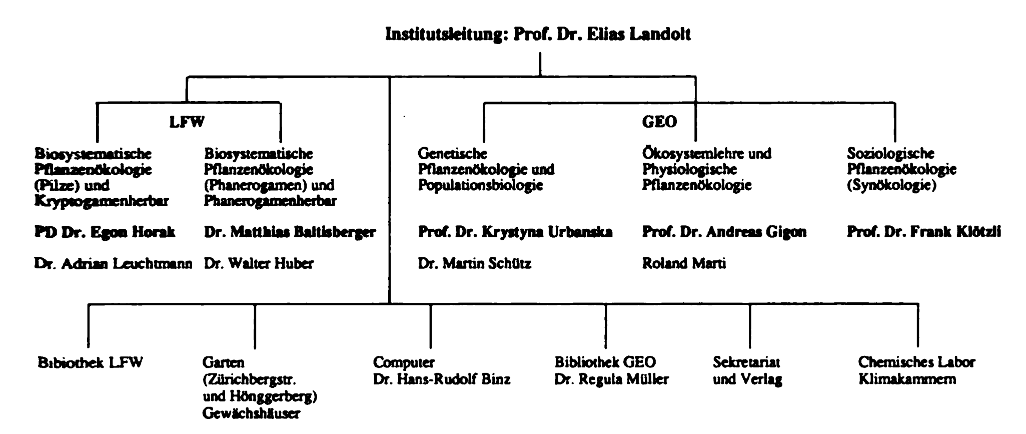


Bild 6 Organigramm des Institutes mit langjährigen Mitarbeitern in Forschung und Lehre.

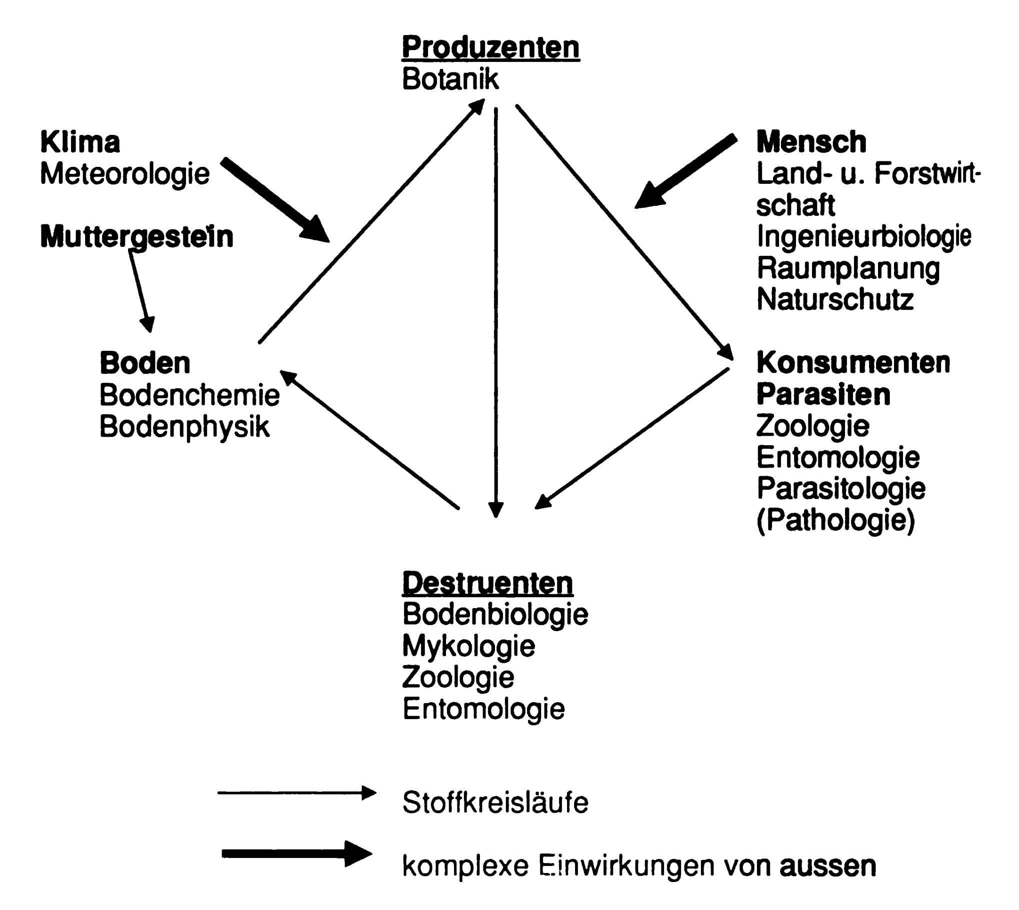
Fig. 6 Organigram of the Institute with collaborators of long standing in research and teaching.

Der grösste Teil des Institutes arbeitet heute im ehemaligen Gebäude der Stiftung Rübel, das 1966 mit einem Labortrakt und einem grossen klimatisierbaren Gewächshaus erweitert wurde (s. Bild 2). 1969 wurden im Keller des alten Gebäudes 4 Klimakammern eingebaut. Das Institut besitzt eine Vielzahl von Feldinstrumenten zur Messung von Standortfaktoren und für ökophysiologische Messungen (darunter Scholanderbomben, Porometer, Tensiometer usw.). Die beiden Gruppen der biosystematischen Ökologie mit dem grossen Herbar sind in den beiden obersten Stockwerken des alten Land- und Forstwirtschaftlichen Gebäudes (LFW) untergebracht, müssen aber im Laufe des Jahres 1990 in das Areal des Botanischen Gartens der Universität an der Zollikerstrasse umsiedeln, wo die beiden Herbarien der Universität und der ETH miteinander geographisch, aber nicht eigentumsrechtlich, vereinigt werden. Die Gruppen bleiben mitsamt dem Herbar dem Geobotanischen Institut angeschlossen. Neben dem Garten an der Zürichbergstrasse betreibt das Institut einen Versuchs- und Experimentiergarten mit Gewächshaus auf dem Hönggerberg. Dagegen hat der Botanische Garten Grüningen, der von der ETH unterstützt wird, keine Beziehungen zum Institut.

3 Heutige Forschung

Das Geobotanische Institut befasst sich in der Forschung heute vor allem mit terrestrischen Ökosystemen, ihren pflanzlichen Bestandteilen, ihren Stabilitäten und Belastbarkeiten und den Wechselwirkungen zwischen einzelnen

Kompartimenten und Faktoren. Bild 7 zeigt ein vereinfachtes Ökosystem, in dem die wichtigeren Nachbardisziplinen eingezeichnet sind, mit denen das Geobotanische Institut oft zusammenarbeitet. Die am Institut durchgeführten Projekte befassen sich vor allem mit dem Kompartiment «Produzenten» (Phanerogamen, Moose), zu einem kleineren Teil auch mit dem Kompartiment «Destruenten» (Basidiomyceten, Ascomyceten), mit all ihren Beziehungen zueinander, zu den umliegenden Kompartimenten und zu den einwirkenden Standortfaktoren (Klima, Boden, Mensch), eingeschlossen Stoffkreisläufe und Energieflüsse (auf dem Bild nicht eingezeichnet).



Vereinfachtes Ökosystem mit Kompartimenten, Stoffkreisläufen und äusseren Einwir- sowie den Fachrichtungen, die sich damit befassen.

plified ecosystem with compartments, nutrient cycles and external influences. The leal with the certain aspects are mentioned.

Neben der Erarbeitung von Grundlagen (60%) dient die Forschung der Beschaffung von Unterlagen für Naturschutz und Raumplanung sowie für Land- und Forstwirtschaft und Ingenieurbiologie (40%). Die Erhaltung der Arten- und Biotopvielfalt in der heutigen Zivilisationslandschaft ist ein zentrales Anliegen. Das Institut umfasst fünf Forschungsrichtungen (Bild 6), die eng miteinander zusammenarbeiten und personell nicht streng getrennt sind: 1. Biosystematische Ökologie von Pilzen, 2. Biosystematische Ökologie von Phanerogamen, 3. Genetische Pflanzenökologie und Populationsbiologie, 4. Ökosystemlehre und physiologische Pflanzenökologie, 5. Pflanzensoziologische Ökologie (Synökologie). Für die einzelnen Richtungen sind in erster Linie die in Bild 4 fettgedruckten Wissenschafter zuständig. Die Forschung wird zu einem grossen Teil von Doktoranden und Diplomanden ausgeführt.

3.1 Biosystematische Pflanzenökologie

Die Bedeutung der Systematik wurde während langer Zeit unterschätzt. Auch in Mitteleuropa ist über die Biologie und Abgrenzung vieler Arten noch sehr wenig bekannt. Gerade in der Pflanzenökologie und ihren Anwendungen ist die genaue Kenntnis der systematischen Einheiten und deren Eigenschaften eine wesentliche Voraussetzung für zuverlässige Aussagen. Populationen und niedere systematische Einheiten bilden die Grundlage, um die Vorgänge in Ökosystemen verstehen zu können. Bioindikationen als Mittel zur Überwachung der Standortbedingungen und pflanzensoziologische Kartierungen als Grundlage für Naturschutz- und Landnutzungsplanung sind ohne genaues systematisches Wissen nicht denkbar. Schliesslich gibt die Kenntnis der ökologischen Sippendifferenzierung auch interessante Einblicke in die Evolutionsvorgänge auf niederster Stufe. Ein wesentliches Instrument für systematische Untersuchungen ist das Herbarium, das zur Identifizierung, Variabilitäts- und Verbreitungsabklärung und Dokumentierung von untersuchten Arten dient. Das ETH-Herbar des Geobotanischen Institutes wurde als drittältestes Herbar der Schweiz (nach Basel und Genf) 1859 gegründet und ist mit etwa 2 Millionen Belegen (davon je die Hälfte Kryptogamen und Phanerogamen) das zweitgrösste Schweizer Herbar (nach Genf mit 5 Millionen Belegen). Es gehört unter den etwa 2000 Herbarien der Welt zu den 30 grössten. Seit einiger Zeit umfasst die Forschung neben den chromosomalen Untersuchungen auch elektrophoretische Analysen in bezug auf Iso- und Alloenzymen.

3.1.1 Pilze (Basidiomycetes, Ascomycetes)

Die Rolle der Pilze als Abbauorganismen der toten organischen Substanz wie auch als Parasiten ist bekannt. Sie ermöglichen erst den Kreislauf der Nährstoffe im Naturhaushalt. Das Myzel zahlreicher symbiontischer Pilze ist mittels spezifischer Enzymsysteme in der Lage, für die Pflanzenwurzel physikalisch und biochemisch nicht oder nur schwierig erreichbare Verbindungen

(Wasser, Mineralsalze, Metallkomplexe, Chelate) im Substrat aufzuschliessen und an ihre Wirtspflanzenpartner im Austausch gegen Kohlehydrate weiterzugeben. Viele Moose, Farne und Blütenpflanzen sind an das Vorhandensein von Pilzmyzelien im Wurzelbereich (Mykorrhizen) gebunden. Von anderen Pflanzen ist bekannt, dass sie an Extremstandorten bei Anwesenheit der entsprechenden Pilzsymbionten eine erhöhte Vitalität und Konkurrenzkraft zeigen, weil durch von den Pilzen stammende Stoffwechselprodukte die Chlorophyllsynthese erleichtert wird und die Resistenz bezüglich Austrocknung und Kälte zunimmt. Die Arbeitsgruppe stellt die ökologischen Funktionen der Pilze (vor allem symbiontischer Basidiomycetes) in den Mittelpunkt der Forschung. Daneben werden einzelne Basidiomycetes-Gruppen systematisch bearbeitet. Zu erwähnen sind besonders monographische Studien an Gattungen der Südhalbkugel. Als Beispiele für die Forschung seien die folgenden teilweise bereits abgeschlossenen Untersuchungen angeführt:

Ökologischer Zeigerwert von Basidiomycetes (vor allem bezüglich Ektomykorrhiza-Bindung zu Wirtspflanzen) in lokal benachbarten, pflanzensoziologisch verschiedenen Habitaten. Im Rahmen eines multidisziplinär konzipierten Projektes wurde die Grosspilzflora auf fünf Versuchsflächen in einem Nord-Süd-Talprofil des Unterengadins untersucht. Im Laufe von 16 Jahren (24 Exkursionen) wurden 536 Pilztaxa festgestellt, die sich ökologisch zwei Gruppen zuordnen lassen: ektotrophe Symbionten der Fichte, Waldföhre, Lärche und Grauerle (31 % der Arten) und Saprobe bzw. Parasiten auf Teilen der am Standort wachsenden Baum- und Krautpflanzen (69 %). Der hohe ökologische Zeigerwert der untersuchten Pilze wird dadurch unterstrichen, dass trotz der langen Versuchsdauer keine einzige Pilzart in allen 5 Biotopen registriert wurde. Nur drei saprobe Taxa konnten in vier und zehn weitere in drei der insgesamt fünf Versuchsflächen gefunden werden. Aus diesen Daten lässt sich ableiten, dass die Grosspilze an den fünf Standorten nicht nur in den Artzahlen sehr viel reicher sind als die Phanerogamen, sondern auch als standortstreu und damit als ökologisch fein differenzierende pflanzensoziologische Indikatoren gelten dürfen.

Wirkung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen auf die Pilzflora von Wiesenstandorten. Die Untersuchungsflächen (4700 m²) liegen in einem Institutsversuchsgelände auf dem Randen bei Merishausen über kalkreichem Gestein und sind mit verschiedenen lokalen Ausbildungen des Trespen-Halbtrockenrasens *(Mesobrometum)* bedeckt. In der drei Jahre dauernden Feldarbeit wurden folgende Versuchsvarianten berücksichtigt: brachliegend, jährlich im Frühling abgebrannt, jedes Jahr (Frühling oder Herbst), jedes zweite Jahr, jedes fünfte Jahr gemäht. Flächen in periodisch gedüngten Mähwiesen und im benachbarten Buchen- und Föhrenwald wurden miteinbezogen. Auf [illegible] Exkursionen wurden insgesamt 195 Grosspilze gefunden, die nach der Ar-[illegible]l-Areal-Kurve nur einen Teil des zu erwartenden Pilzinventars [illegible]entieren. Die Auswertung zeigt: a) Die Zusammensetzung der Pilzflora [illegible] verschiedenen Standorten unterscheidet sich teilweise deutlich von-

einander. b) Die Pilzflora ungedüngter gemähter Wiesen ist quantitativ und qualitativ identisch mit jener kurz brachliegender Wiesen. c) Bei mehr als 8jähriger Brache nimmt Zahl und Dichte der Arten zu. d) Das Abbrennen fördert Frequenz und Abundanz nährstoffzeigender saprober Arten. e) In intensiv bewirtschafteten Wiesen wird die Fruktifikation der Pilze fast vollständig unterdrückt. f) Nur ca. 30% der spontan in den Wiesen aufwachsenden einjährigen Waldföhren-Pflanzen zeigten an ihren Kurzwurzeln Myzel einer Ektomykorrhiza.

Wirkung der Klärschlammdüngung auf die Pilzflora von Waldbäumen. In einem Eichen-Hagebuchenwald bei Genf wurden die Folgen einer einmaligen Klärschlammdüngung mit 200, 400, 600 und 800 m^3/ha für die Pilze untersucht. Die Auswertung zeigte, dass der Klärschlamm vor allem streng obligate Mykorrhizapilze in ihrem Fruktifikationsverhalten negativ beeinflusst (Ausfall der meisten Fruchtkörper auch noch nach 10 Jahren bei 200 m^3/ha). Die gleiche Reaktion zeigten auch fakultative Ektomykorrhizapilze bei der doppelten Klärschlamm-Menge. Eine einzige Ausnahme bildete der Blätterpilz *Laccaria laccata*, eine ruderale Art offener, nährstoffreicher Plätze, der alle Klärschlammstandorte dominierte. Die Fruktifikation der saproben Pilze wurde durch die Düngung nicht beeinflusst, jene des gefürchteten Wurzelparasiten Halimasch stimuliert, was seine Ausbreitung förderte. Die Resultate lassen vermuten, dass nicht nur der Klärschlamm einen sehr negativen Einfluss auf das Waldökosystem hat, sondern dass auch die Nährstoffeintragungen durch die Luftverschmutzung ähnlich wirken und der allgemein gemeldete Rückgang der Pilzflora in unseren Wäldern damit zusammenhängt.

Eine neue Arbeitsgruppe untersucht mittels elektrophoretischen Methoden (Untersuchungen von Iso- und Alloenzymen) ökologisch-systematische Differenzierungsmuster bei Ascomyceten, die als Endophyten in Gräsern leben.

3.1.2 Phanerogamen

In der Systematik der Blütenpflanzen werden einzelne taxonomische Gruppen möglichst vielseitig auf ihre Eigenschaften untersucht, um einerseits Evolutionsvorgänge, andererseits aber auch das ökologische Verhalten besser zu verstehen. Es werden morphologisch-anatomische, karyologische, biochemische und physiologisch-ökologische Merkmale studiert und auch die genetischen Beziehungen abgeklärt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt bei Artengruppen der mittel- und südeuropäischen Gebirge.

Chemische Naturstoffe als taxonomische Merkmale. In Zusammenarbeit mit dem Pharmazeutischen Institut werden mittel- und südeuropäische Artengruppen auf gewisse chemische Inhaltsstoffe (Flavonoide, Iridoide) mit chromatographischen Methoden untersucht und die Ergebnisse mit morphologisch-ökologischen und karyologischen Messungen verglichen. Die Verwandtschaft der Arten wird ebenfalls anhand von Kreuzungsexperimenten überprüft. Die untersuchten chemischen Stoffe und die Mengenverhältnisse der einzelnen Stoffe eignen sich zum Teil gut zur Stützung von taxonomischen

Einteilungen. Bei den chemischen Untersuchungen konnten einige neue Stoffe aufgeklärt werden. Die bis heute bearbeiteten Gruppen gehören zu den Gattungen *Stachys* und *Betonica*, beides Lippenblütler. Es ist geplant, ähnliche Untersuchungen auch bei Doldenblütlern durchzuführen. Zusätzlich werden isoenzymatische Untersuchungen angewendet.

Experimentelle Sippendifferenzierungen bei Scabiosa columbaria s.l. (Tauben-Skabiose). Die Gruppe, die aus zahlreichen Arten mit unterschiedlichen geographischen und ökologischen Verbreitungen besteht, ist im Alpengebiet experimentell-taxonomisch bereits früher abgeklärt worden. In einem über 15jährigen Versuch wurden drei verschiedene Arten, die miteinander frei bastardieren, unter verschiedenen Temperatur-, Nährstoff- und Wasserbedingungen kultiviert und die Entwicklung der verschiedenen Populationen unter den vorhandenen Selektionsbedingungen verfolgt, wobei freier Genaustausch zwischen den Arten der gleichen Bedingungen möglich war. Es zeigte sich, dass sich in dieser relativ kurzen Zeitspanne unter den gegebenen Bedingungen aus allen Populationen ähnliche Merkmalskombinationen entwickelt haben, die sich zwischen den verschiedenen Bedingungen teilweise signifikant unterschieden und zu einem grossen Teil genetisch bedingt sind. Es konnten also kurzfristig auf experimentellem Wege Ökotypen hergestellt werden.

Biosystematische Untersuchungen bei der Familie der Lemnaceae (Wasserlinsen). Die kleine weltweit verbreitete Familie der Wasserlinsen besteht aus vier Gattungen und 34 Arten, die durch ihre flutende Lebensweise auf oder unter der Wasseroberfläche gekennzeichnet sind. Die Pflanzen lassen sich aseptisch in Reagenzröhren oder Erlenmeyer-Kolben kultivieren und pflanzen sich vorwiegend vegetativ durch Tochterglieder fort. Im günstigsten Fall können sie ihre Gliederzahl in weniger als einem Tag verdoppeln. Sie eignen sich deshalb sehr gut als physiologische Versuchs- und als Testpflanzen für den Nachweis von bestimmten chemischen Bedingungen. Als Proteinlieferanten (bis zu 45% des Trockengewichtes besteht aus Aminosäuren) und zur Entfernung von Schmutzstoffen in Gewässern haben sie eine gewisse ökonomische Bedeutung erlangt. Am Institut wurden insgesamt gegen 3000 lebende Klone von Lemnaceen aus aller Welt morphologisch untersucht, von vielen Klonen die Chromosomen gezählt, chemische Eigenschaften studiert (zusammen mit dem Agrikulturchemischen Institut) und der Nährstoffbedarf und andere physiologische Eigenschaften abgeklärt. Die geographische Verbreitung und die physiologischen Erkenntnisse ermöglichten die Grenzen der Verbreitung der einzelnen Arten in der Natur mit einzelnen klimatischen Faktoren in Beziehung zu setzen. Auf Grund dieser Untersuchungen und unter Verwendung der sehr zahlreichen Literatur wurde die Familie taxonomisch gegliedert und eine zweibändige Monographie erarbeitet (E. Landolt 1987, 1988), die den zahlreichen Institutionen, die heute weltweit mit Vertretern dieser Familie arbeiten, als Nachschlagewerk dienen kann. Am Institut werden noch heute etwa 1200 lebende Klone kultiviert, von denen laufend einzelne an auswärtige Institute versandt werden.

3.2 Genetische Pflanzenökologie und Populationsbiologie

Die Arbeitsgruppe untersucht die Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Variation innerhalb von Pflanzenarten, Populationsstrukturen, Fortpflanzungs- und Keimungsstrategien und Verbreitung vieler Sippen. Die Untersuchungen werden heute fast ausschliesslich in der alpinen Stufe von Davos durchgeführt, wo drei unterschiedliche Gesteinsunterlagen vorherrschen: Dolomit, saures Silikat und Serpentin. Auf der einen Seite wird in der Grundlagenforschung das Verhalten von alpinen Sippen abgeklärt, auf der anderen Seite anwendungsorientiert über biologische Erosionsbekämpfung oberhalb der Waldgrenze gearbeitet.

Populationsbiologie und Fortpflanzungsstrategien. Die Fortpflanzungsstrategien verschiedener alpiner Pflanzenarten, darunter besonders die asexuellen (Agamospermie, vegetative Propagulenbildung, Klonfragmentation), stehen heute im Vordergrund der Grundlagenforschung. *Biscutella levigata* ist ein Beispiel von untersuchten Arten. Sie ist allogam und selbststeril. Der Genaustausch ist indessen offensichtlich eingeschränkt durch Faktoren, die die Bestäubung, Samenentwicklung und Samenverbreitung beeinflussen. Dolomit- und Serpentinpflanzen weisen eine deutliche Adaptation an das jeweilige Substrat auf: Sowohl die Samenkeimung wie auch die Sterblichkeit und Entwicklung der Jungpflanzen war in der Klimakammer, im Gewächshaus und in Feldversuchen stark vom Substrat und von der Herkunft abhängig. *B. levigata* bildet edaphische Rassen auf verschiedenen alpinen Substraten. Daneben wurde noch eine klinale Differenzierung auf Dolomit gefunden. Subpopulationen im dichten Dolomitrasen sind klein, die klonalen Einheiten haben eine geringe Dichte, und Keimpflanzen sind selten. Subpopulationen auf Dolomitschutt sind gross, haben eine hohe Dichte von klonalen Einheiten und häufig Keimlinge. Subpopulationen auf intermediären Dolomitflächen stehen dazwischen. Im Gegensatz zum Verbreitungsmuster auf Dolomit ist das demographische Verhalten von *B. levigata* auf Serpentin einheitlich und gleicht jenem auf Dolomitschutt.

Begrünung von hochalpinen Skipistenplanien. Die Kenntnis der Vielfalt der Arten mit unterschiedlichen Standortansprüchen, Wuchsformen und Fortpflanzungsstrategien bildet die Grundlage für die neu entwickelten Methoden der Standortbegrünung. Bereits früher wurden die Keim- und Aufwuchsbedingungen vieler Arten abgeklärt. Die bisherigen Verfahren bei der Begrünung von hochalpinen Skipistenplanien mit Samengut des Tieflandes und intensiver Düngung (z.T. mit Klärschlamm) haben sich als nicht geeignet erwiesen, verhinderten sie doch die Einwanderung der einheimischen Pflanzen, nicht aber die Erosion der Feinerde, wie bereits frühere Untersuchungen am Institut nachwiesen. Zudem belasten sie die Landschaft mit Düngestoffen und z.T. auch mit Schwermetallen, da die Böden wegen der Flachgründigkeit in hohen Lagen über ein geringes Adsorptionsvermögen verfügen. Die Folge sind grossflächige, besonders im Sommer unangenehm auffallende Stein-

wüsten. Die Methode der standortgerechten Begrünung, die von der Arbeitsgruppe entwickelt wurde, arbeitet einerseits mit Saatgut, andererseits mit Anpflanzungen von einheimischen Pflanzen. Es werden besonders Pflanzenarten, die auch in der umgebenden Natur Rutschhänge und Geröllhalden und anschliessende Sukzessionsstadien besiedeln, verwendet. Die Samen stammen entweder direkt aus der Umgebung oder von vorher in Versuchsgärten vermehrten Pflanzungen. Samen aus Gärten haben den Vorteil, dass sie in grösserer Quantität und immer von gleich guter Qualität (mit bedeutend mehr Reservestoffen) zur Verfügung stehen. Die Samen werden, sofern nötig, zur besseren Keimung vorbehandelt, und die Bedingungen am Ort der Aussaat durch biologisch abbaubare Textilien vor Ausschwemmung und Austrocknung geschützt. Eine Umgehung der schwierigen Keimungs- und Aufwuchsphase wird möglich, wenn bereits ausgewachsene Individuen am Ort ausgepflanzt werden (Bild 8). Diese werden durch ein besonderes am Institut entwickeltes Klonierungsverfahren (Einzelrametklonierung) bereitgestellt. Die Bepflanzungen sind sehr arbeitsintensiv und teuer, aber erfolgversprechend und deshalb wesentlich besser als bisherige Methoden. Die erfolgreichen Ergebnisse der Untersuchungen sollen aber keinesfalls ein Alibi geben für weite-

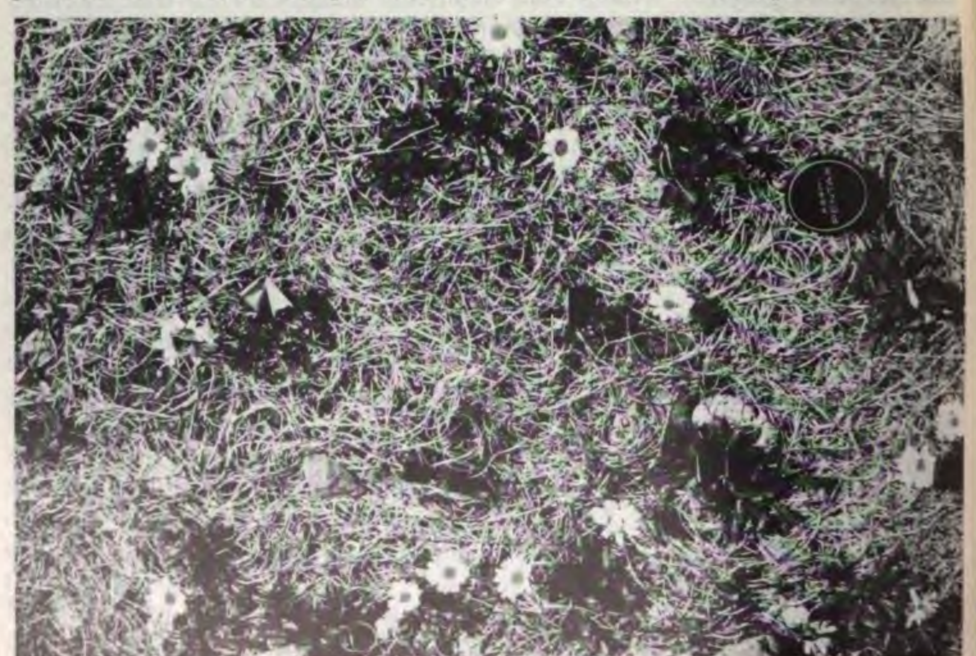


Bild 8 Aufwuchs von klonierten und eingepflanzten Individuen von Hallers Margerite *(Chrysanthemum halleri)* auf Skipistenplanien am Strelahorn (2400 m ü.M.) im ersten Jahr nach der Pflanzung.

[illegible]. 8 Growth of cloned and planted individuals of *Chrysanthemum halleri* on levelled skiruns [illegible]w Strelahorn, Davos (2400 m a.s.l.), one year after plantation.

re grossflächige Planierungen, sondern lediglich auf kleineren Flächen von 3–5 Aren die Beseitung von gefahrvollen Pistenstellen ermöglichen, ohne nachhaltige Eingriffe in die Landschaft.

Polymorphismus der Cyanogenese beim Hornklee (Lotus). Lotus corniculatus s.l. wurde nicht nur in bezug auf die Verbreitung von Chromosomenzahlen (diploide und tetraploide Pflanzen), sondern auch von cyanogenen und acyanogenen Pflanzen untersucht. Bei der alpinen Sippe *(L. alpinus)* wurden verschiedenartige Verbreitungsmuster von Phänotypen und Allelen beobachtet, die vermuten lassen, dass unterschiedliche Selektionsfaktoren auf den beiden Unterlagen wirken. Auf Silikatunterlage waren die Pflanzen weitgehend acyanogen, während auf Karbonatunterlage cyanogene Pflanzen vorherrschten. Der Polymorphismus der Cyanogenese zeigte sich nicht nur in den hauptsächlichen Phänotypen, sondern auch in der Allelzusammensetzung. Über die Hintergründe der unterschiedlichen Selektionswirkung auf Populationen verschiedener Gesteinsunterlagen können bis heute nur Vermutungen aufgestellt werden.

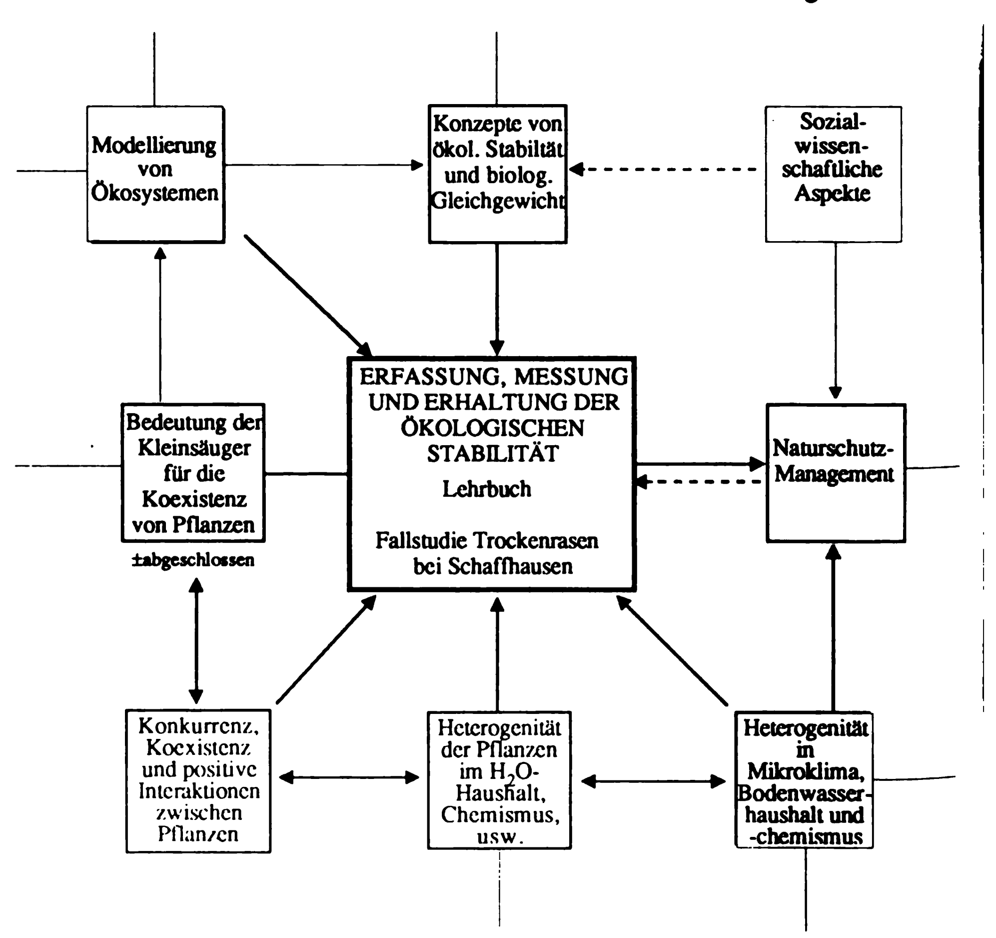
3.3 Ökosystemlehre und physiologische Pflanzenökologie

Einenteils stehen Untersuchungen zwischen Standortfaktoren und physiologischen Merkmalen im Vordergrund, wobei neben Klima- und Bodenmessgeräten auch pflanzenphysiologische Apparaturen (Scholander-Bomben, Porometer u.a.m.) verwendet werden. Andererseits werden anhand experimenteller pflanzenökologischer Ergebnisse Modelle und Theorien über das Funktionieren von Ökosystemen (insbesondere ihrer Stabilität) erarbeitet. Die Zusammenhänge der Arbeiten innerhalb der Gruppe sind in Bild 9 dargestellt.

Erfassung, Messung und Erhaltung der ökologischen Stabilität. Es handelt sich um eine Konzeptarbeit zu Fragen wie: «Was ist ökologische Stabilität? Wie kann sie quantitativ erfasst und wie bewertet werden? Wie kann sie wiederhergestellt werden und wo ist dies überhaupt sinnvoll?» Die Konkretisierung und Überprüfung der Konzeptarbeit erfolgt anhand von Literaturstudien über Urwald- und Sukzessionsforschung, Naturschutzbewirtschaftung, Waldschadenforschung, Ökotoxikologie, systemökologische Modellierung usw. Das Gesamtziel ist ein Lehrbuch über «Ökologische Stabilität und biologisches Gleichgewicht» (A. Gigon).

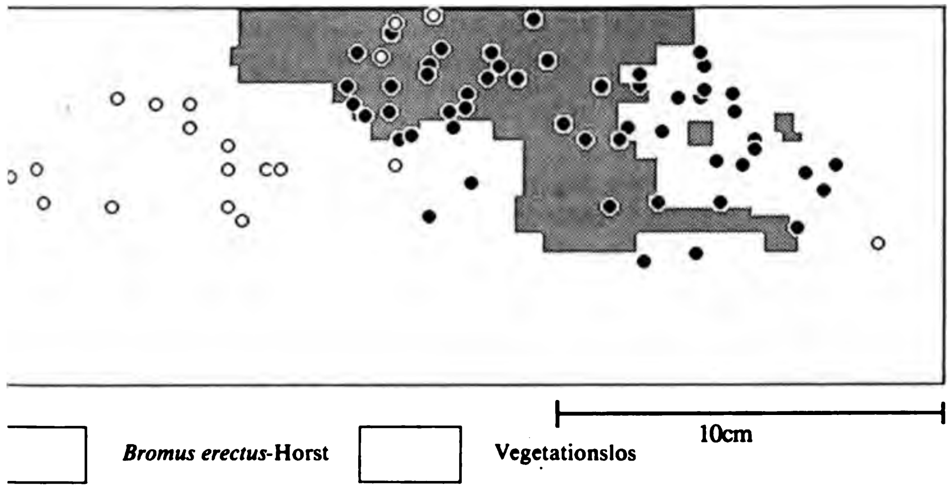
Experimentelle Untersuchungen zur Erhaltung artenreicher Trockenrasen. Die Untersuchungen zu den Trockenrasen, die auf dem Schaffhauser Randen bei Merishausen durchgeführt werden, bilden eine konkrete Fallstudie zur Konzeptarbeit über die ökologische Stabilität. Ein Hauptinteresse liegt auf den Fragen, warum die dort vorhandenen Trespen-Halbtrockenrasen so artenreich sind (bis zu 40 Arten/m²), auf welche Weise diese vielen Pflanzenarten koexistieren können und wie der Artenreichtum langfristig (und mit möglichst geringem Aufwand) erhalten werden kann. Es geht also um die Erfassung der

Vielfalt an Pflanzenarten und der Änderung ihrer Dominanzverhältnisse in Abhängigkeit von Klima und Bewirtschaftung. Dabei werden ausgewählte Mikroklima- und Bodenfaktoren gemessen und Feldexperimente zur Konkurrenz und zu positiven Interaktionen zwischen den Pflanzenarten durchgeführt, um ihre Koexistenz zu verstehen. Als Beispiel seien die Untersuchungen der Auswirkungen von ausgewachsenen Pflanzen auf die Etablierung von Keimlingen erwähnt (Bild 10). Diese und die nachfolgende Entwicklung der Jungpflanzen wurde an verschiedenen Mikrostandorten in der Umgebung der ausgewachsenen Pflanzen untersucht und der Einfluss der ausgewachsenen Pflanzen auf den Bodenwasserhaushalt dieser Mikrostandorte gemessen. Es



ht über die verschiedenen Teilprojekte der Arbeitsgruppe **Ökosystemlehre und** flanzenökologie. Dünne Linien bedeuten interdisziplinäre **Verknüpfungen.**

the different partial projects of the working group **dealing with ecosystems** ogy. Thin lines show interdisciplinary connections.



Arabis hirsuta-Keimling, gekeimt in Herbst 1987, lebt noch im Mai 1988

Arabis hirsuta-Keimling, gekeimt in Herbst 1987, tot im Mai 1988

ld 10 Das Überleben von Keimlingen der Rauhhaarigen Gänsekresse *(Arabis hirsuta)* an ver-
ıiedenen Mikrostandorten um einen Horst der Aufrechten Trespe *(Bromus erectus)* in Trocken-
ıen im Randen (Schaffhausen). Man sieht, dass die Keimlinge unmittelbar neben und im Horst
sser überleben als an vegetationslosen Stellen. *B. erectus* hat also einen positiven Einfluss auf
: Etablierung von *A. hirsuta*.

ţ. 10 Surviving of seedlings of *Arabis hirsuta* on different microhabitats around a tussock of
omus erectus in a dry meadow of the Randen (mountain near Schaffhausen). Seedlings around
: tussock survive better than on the bare ground. *B. erectus* shows a positive microclimatic in-
ence on the establishment of *A. hirsuta*.

igte sich, dass im Bereich eines Horstes der Aufrechten Trespe der Boden-
asserhaushalt an der Oberfläche günstiger ist als im vegetationslosen
ereich der Kahlstellen dazwischen, was sich in einem deutlich höheren
berlebensprozent der Keimlinge äussert. In Graslandökosystemen spielen
so neben der Konkurrenz auch positive Wechselwirkungen eine Rolle, wie
ereits früher in Untersuchungen zu Pflanzen-Tierbeziehungen (z.B. Einwir-
ung von Mäusen und Ameisen) gezeigt werden konnte. Die Ergebnisse wer-
en zur systemökologischen Modellierung verwendet.

In den Wiesen im Randengebiet werden seit 15 Jahren auch Bewirtschaf-
ıngsversuche (Mahd, verschieden lange Brachen, Brand) durchgeführt, um
Methoden für eine langfristige Erhaltung der Artenvielfalt zu entwickeln.

.4 Pflanzensoziologische Ökologie

ede Pflanzengesellschaft hat nicht nur eine spezifische Artengruppenkombi-
ation, sondern zeigt auch spezifische Standortverhältnisse an in bezug auf

Licht, Wasser und Nährstoffe sowie auf mechanische und biotische Faktoren. Die Kenntnisse dieser Vegetations- und Standorteigenheiten liefern besonders der Land- und Forstwirtschaft, aber auch der naturschützerischen Praxis wichtige Entscheidungsgrundlagen für Bewirtschaftung und Schutz. Es lassen sich Angaben ableiten über Belastbarkeit, Stabilität und natürliche Fluktuationen solcher Ökosysteme. Pflanzensoziologische Arbeiten sind oft auch verbunden mit der kartographischen Erfassung der Vegetation, um zu flächenhaften Aussagen zu gelangen. Bei mehrfacher Ausführung in verschiedenen Jahren werden auf diese Weise unerwünschte oder gewollte Veränderungen der Vegetationsdecken festgestellt. So können beispielsweise Schutz- und Pflegemassnahmen besser umrissen und für die Erhaltung seltener Vegetationseinheiten genauer formuliert und unerlaubte Eingriffe nachgewiesen werden.

Zur Kenntnis und Erhaltung von Feuchtgebiets-Ökosystemen. Am Institut wurden neben den bereits erwähnten mageren Halbtrockenrasen vor allem seltene Gesellschaften der Feuchtgebiete bearbeitet. Bei zunehmender Eutrophierung der Boden- und Wasserverhältnisse durch Düngemitteleintrag und angereicherten Niederschlag interessiert hier vor allem die Überlebensmöglichkeit ausgeprägt oligotropher Pflanzengesellschaften in unserer Kultur- und Zivilisationslandschaft und die Erfassung der Randbedingungen zu ihrer Erhaltung. Deshalb wurden und werden die Standortverhältnisse, Belastbarkeit und Abschirmungsmöglichkeiten von Pfeifengraswiesen, Kleinseggenriedern, Grossseggenriedern sowie Schwingrasen an oligotrophen Seen und im Hochmoorbereich untersucht. Auch die Umwandlungsgeschwindigkeit empfindlicher Pflanzengesellschaften in Abhängigkeit von der Nährstoffzufuhr wurde besonders beachtet. Um zu gesicherten Ergebnissen zu gelangen, sind mit Vorteil die Wasser- und Nährstoffverhältnisse entlang von Transsekten zu untersuchen, die parallel den entsprechenden Gradienten von reich zu arm, von trocken zu feucht usw. verlaufen. Damit verbunden werden oft auch die entsprechenden Gesellschaften inventarisiert, um Seltenheit, Repräsentanz und Flächengrössen zu erfassen. Aus diesen Unterlagen lassen sich die Rahmenbedingungen für die Erhaltung seltener Einheiten umschreiben. Als Beispiel für solche Untersuchungen sind Arbeiten im Urner Reussdelta zu erwähnen. Dort ist das Öffnen beider Reussdämme im Uferbereich vorgesehen. Um die Folgen auf die Vegetation überwachen zu können, müssen die Vegetation (durch pflanzensoziologische Aufnahmen, Kartierungen, Einrichten von Dauerflächen) und der Standort (durch Wasser- und Bodenanalysen, Grundwasserstandsmessungen) sowie der Uferbereich und die Gräben (durch Erfassung chemischer und physikalischer Parameter, Algen und Makroinvertebraten im Jahresverlauf) erforscht werden. Im Verlauf der Hochwasserkatastrophe im Sommer 1987 wurde das ganze Gebiet überschlickt, so dass jetzt mit den bereits erfolgten Untersuchungen günstige Voraussetzungen bestehen, die Vegetationssukzession auf den Flächen zu verfolgen.

Rückgang der Schilfbestände. Auch an unseren Seeufern haben sich die Bedingungen in den letzten 40 Jahren grundlegend geändert. Besonders die Schilfbestände sind an vielen Orten in katastrophalem Masse zurückgegangen. In verschiedenen Arbeiten zur Ursächlichkeit des Rückganges und zur praktischen Erhaltung von Restbeständen, konnte gezeigt werden, dass die Eutrophierung u.a. die mechanischen Eigenschaften der Schilfhalme verändert, und dass, solange die Seenverschmutzung nicht rückgängig gemacht wird, ein mechanischer Schutz vor Wellen, Algenwatten und Getreibsel die Schilfbestände retten kann.

Ökologische Grenzen von dominierenden Waldbäumen. Etwas anders gelagert sind die Themenkreise im Waldbereich. Das Schwergewicht der Untersuchungen liegt hier bei der Erfassung von Grenzbedingungen dominierender Baumarten und Waldgesellschaften. Neben der Tanne, Fichte, Föhre, Eiche, Linde und anderen Edellaubhölzern interessiert vor allem die soziologische und synökologische Stellung der Buche in den von ihr beherrschten Pflanzengesellschaften, insbesondere das Verhalten und die Vitalität bzw. Überlebensmöglichkeit dieser Baumarten in Grenzlagen, also unter dem Stress von Trokkenheit, Nässe, Nährstoffmangel oder verstärkten mechanischen Faktoren. Auch diese Faktoren werden entlang von Transsekten in der Wirkungsrichtung analysiert. In diesem Zusammenhang konnten weitere Erkenntnisse zur Verbreitung der Schweizer Waldgesellschaften gewonnen, neue seltenere Waldgesellschaften erfasst und ihre spezifischen Standortverhältnisse festgestellt werden. Zusätzliche Informationen lieferten die zahlreichen Waldkartierungen im Mittelland, in den Voralpen und in den nördlichen und zentralen Alpen, die im Auftrag von Kantonen und anderen Stellen durchgeführt wurden. Es ist vorgesehen, diese Erkenntnisse in eine Neuauflage der Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz einfliessen zu lassen. – In den letzten Jahren ergaben sich auch Gelegenheiten, Vegetationsverhältnisse im Ausland zu bearbeiten. Dabei konnten nicht nur Grenzlagen, Belastbarkeit, Stabilität und Bewirtschaftung tropischer Grasländer von Niederungs- und Gebirgslagen erfasst werden, sondern auch benachbarte Wälder. In erster Linie wurden so die Grenzlagen weiterer Fagaceen-Gattungen *(Quercus, Lithocarpus, Nothofagus)* im Bereich der (Mit-)Herrschaft von *Myrtaceae, Pinaceae, Podocarpaceae* und *Lauraceae* verfolgt.

Stadtvegetation. In neuerer Zeit ist auch mit Untersuchungen über die Stadtvegetation begonnen worden. Ziel dieser Forschung ist es, die vielfältigen städtischen Ökosysteme mit dem grossen Artenreservoir zu erhalten oder zu fördern, um einer Reihe von Arten, die in der intensiv genutzten Landschaft heute keinen Platz mehr haben, das Überleben zu ermöglichen. So werden u.a. Schutt- und Ruderalgesellschaften, Rasen- und Weidengesellschaften sowie Sukzessionen auf verbrachten Flächen studiert, um Artengarnitur und Standorterfordernisse der verschiedenen Einheiten festzustellen und die für die Erhaltung der Artenvielfalt wichtigen Faktoren kennenzulernen.

4 Ausblick

Das Institut ist gegenwärtig immer noch in einer Expansionsphase, bedingt durch die stets wachsende Zahl von Studenten, die Unterricht in systematischer und ökologischer Botanik brauchen, und vor allem auch im Hinblick auf die neue Abteilung für Umweltnaturwissenschaften, von der zahlreiche Diplomanden und Doktoranden zu erwarten sind. Die grossen Umweltprobleme fordern vom Institut auch stets grösseren Einsatz für die Bearbeitung von Naturschutzanliegen. Das Institut wird gegenwärtig von grossen Platzsorgen geplagt. Reserven bestehen am Institut keine. Seit Beginn des Jahres 1990 sind die Professoren und Institute der ETH forschungsmässig zu Departementen vereinigt. Unser Institut gehört zum Departement für Umweltnaturwissenschaften. Es ist geplant, dass in naher Zukunft neue ökologische Professuren geschaffen werden, die unserem Institut Entlastung bringen sollen. So ist bereits eine Professur für experimentelle Ökologie ausgeschrieben, die allerdings an unserem Institut keinen Platz hat, sondern mit den Professuren für Bodenchemie, Bodenphysik, Bodenschutz und einer neuen Professur für Bodenbiologie in Schlieren zu einem neugeschaffenen Institut für terrestrische Ökologie vereinigt wird. Ob später einmal alle Mitglieder des Departementes für Umweltnaturwissenschaften unter einem Dach und mit genügend Platzreserven vereinigt werden können (z.B. in Dübendorf auf dem Areal der EAWAG) ist noch ungewiss.

Es bleibt eine verpflichtende, aber auch faszinierende Aufgabe für das Institut, die vielfältigen Beziehungen der Pflanzen zur Umwelt zu erforschen sowie die Studierenden für die Natur zu begeistern und sie zur Lösung der mit der heutigen Zivilisation und Wohlstandsgesellschaft verbundenen schwerwiegenden Probleme zu engagieren. Damit hoffen wir, zur Erhaltung des Reichtums und der Stabilität von Natur und Landschaft beitragen zu können.

Dr. E. Landolt, Prof. Dr. F. Klötzli, Prof. Dr. K.M. Urbanska, Prof. Dr. A. Gigon, PD Dr. und Dr. M. Baltisberger, Geobotanisches Institut ETH, Stiftung Rübel, Zürichbergstras- -8044 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/2*: 117–127

Die Bedeutung des Waldes für die Tierwelt[1]

Kurt Eiberle, ETH Zürich

1 Statistische Angaben, historische Entwicklung, Waldfunktionen

1.1 Einige Zahlen über den Schweizer Wald

Von der Gesamtfläche der Schweiz, die rund 41 293 km² umfasst, entfallen 11 179 km² oder 27 Prozent auf das Waldareal.

Die Waldfläche ist sehr ungleich auf die verschiedenen Regionen verteilt. Hohe Bewaldungsprozente finden sich im Jura (39 Prozent), auf der Alpensüdseite (38 Prozent) und in der nördlichen Voralpenzone (35 Prozent). Weit spärlicher bewaldet ist dagegen das Mittelland (25 Prozent), bedingt durch seine besondere Eignung für die Landwirtschaft, sowie auch der Alpenraum (21 Prozent), wo grosse Arealteile oberhalb der klimatischen Waldgrenze liegen.

Die nachhaltig mögliche Holzproduktion wird für den gesamten Schweizer Wald auf jährlich 5,7 Millionen m³ geschätzt, wogegen die Jahresnutzung gegenwärtig (1981 bis 1985) lediglich 4,2 Millionen m³ beträgt. Diese Nutzungsmenge reicht zur Deckung des Holzbedarfes nicht aus, so dass unsere holzverarbeitende Industrie regelmässig auf Holzimporte angewiesen ist.

In die Waldfläche teilen sich im Verhältnis 73 : 27 Prozent 4000 öffentlich-rechtliche Körperschaften und 200 000 Privatpersonen als Eigentümer. Der überwiegende Teil des öffentlichen Waldes befindet sich im Besitz von Gemeinden und Korporationen.

1.2 Rückblick auf die Waldgeschichte

Unterhalb der klimatischen Waldgrenze war ursprünglich auch die Schweiz grösstenteils von Wald bedeckt. Die Wälder entstanden nach der Eiszeit durch die Rückwanderung der Baumarten aus ihren Rückzugsgebieten. Sie folgten dabei den Tälern, vermochten aber auch Alpenpässe zu überwinden, weil während des nacheiszeitlichen Wärmeoptimums die klimatische Waldgrenze 200 bis 400 m höher lag als heute. Als Folge bedeutender Klimaveränderungen lassen sich verschiedene Waldperioden deutlich unterscheiden, wobei der Naturwald in den tieferen Lagen seit dem Rückzug der Gletscher folgende Entwicklung durchlief (H. Leibundgut, 1983):
- Tundra mit Silberwurz
- Lichte Birken- und Föhrenwälder sowie baumlose Gesellschaften mit Silberwurz, Weiden, Aspen und Zwergbirken
- Birken- und Föhrenwälder
- Haselreiche Föhren- und Eichenmischwälder mit Linde und Erle
- Eichenmischwälder mit Linde, Esche, Ulme und Hagebuche
- Eichenmischwälder mit zunehmendem Buchenanteil
- Buchenwälder und buchenreiche Mischwälder, Tannenwälder

Die heute vorhandenen Waldgesellschaften sind verhältnismässig jung. Die Rotbuche wanderte aus ihren südöstlich der Alpen und in der südlichen Provence gelegenen Refugien erst vor etwa 4000 Jahren als eine der letzten Baumarten wieder ein.

1.3 Waldzerstörung und Waldausbeutung

Die Einwirkung des Menschen auf den Naturwald blieb gering, solange er vorwiegend als Jäger, Fischer und Sammler tätig war. Tiefgreifende Waldveränderungen setzten aber ein, als der

[1] Gekürzte Fassung des in Feld Wald Wasser/Schweizerische Jagdzeitung, 16. Jahrgang, Heft 10, 1988, Seiten 32–41, erschienenen Artikels. Für die Druckerlaubnis danken wir dem Autor und dem Verlag.

Mensch begann, in zunehmendem Masse die Wälder mit seinen Viehherden zu nutzen und sie zugunsten des Ackerbaus zu verdrängen. Die intensivste Rodungstätigkeit fiel in die Zeit zwischen dem 7. und 14. Jahrhundert, und schon bald danach war die grösste Ausdehnung der Waldrodungen erreicht.

Später fügten Waldweide, Nadel- und Blattstreuenutzung, übermässige Bezüge von Bau- und Brennholz sowie eine rücksichtslose Holzausbeutung für Köhlerei, Glashütten, Kalkbrennen, Zuckerbrennen, Bergbau und Salinen dem Wald andauernd schwere Schäden zu. Der dadurch verursachten Holznot versuchte man mit forstpolizeilichen Vorschriften entgegenzuwirken, jedoch zumeist mit völlig unzureichendem Erfolg. Erst zu Beginn des 18. Jahrhunderts regte sich ein stetig wachsendes Interesse für die Entwicklung einer geregelten Forstwirtschaft, wobei man in Anlehnung an den landwirtschaftlichen Pflanzenbau zunächst versuchte, mittels Kahlschlagbetrieb und standortsfremden Monokulturen aus Fichte oder Waldföhre höchstmögliche Holzerträge zu erzielen. Folgenschwere Rückschläge, wie Insektenkalamitäten, Pilzkrankheiten, Sturmschäden, Bodenverschlechterungen und Wuchsstockungen, blieben aber nicht aus und führten langsam zur Erkenntnis, dass ein erfolgreicher Waldbau in hohem Mass an naturnahe Wälder gebunden ist.

Die junge Forstwirtschaft konnte nicht verhindern, dass im gesamten Alpenraum Raubbau und Waldzerstörung bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts andauerten. Hochwasserkatastrophen, die sich zwischen 1834 und 1868 mehrmals ereigneten, führten schliesslich in den Jahren 1876 und 1902 zum Erlass der ersten schweizerischen Forstgesetze. Durch das heute noch gültige Forstgesetz von 1902 wurde der gesamte Schweizer Wald der Oberaufsicht des Bundes unterstellt mit dem Ziel, die Schutzwirkungen der Wälder gegen katastrophale Naturereignisse zu verbessern. Wir verdanken diesem Gesetz die Bestimmungen über die Erhaltung des Waldareals, den Ausbau des Forstdienstes, über die Nachhaltigkeit im öffentlichen Wald, die Ablösung schädlicher Nebennutzungen sowie das Verbot des Kahlschlages im Schutzwaldgebiet. Sie ermöglichten grundlegende Verbesserungen des allgemeinen Waldzustandes, von denen heute auch die waldbewohnende Tierwelt erheblich profitiert.

1.4 Bedeutung des Waldes für den Menschen

In der heutigen Kulturlandschaft erbringt der Wald für den Menschen vielseitige Leistungen:

Seine Versorgungsleistungen erstrecken sich in erster Linie auf das Holz als Baustoff, Brennstoff, Werkstoff und industrieller Rohstoff. Da der Weltholzbedarf ständig steigt, wird die Holzproduktion zukünftig an Bedeutung gewinnen. Der gegenwärtige Geldertrag aus dem Wald ist dagegen gering, weil im Verlauf der letzten Jahrzehnte die Holzerntekosten ungleich stärker angewachsen sind als die Holzerlöse. Vielen Kleinlandwirten und Bergbauern liefert der Wald aber auch heute noch einen dringend benötigten Nebenerwerb.

Gewisse Schutzfunktionen des Waldes wurden schon frühzeitig erkannt. Es handelt sich dabei um die Verminderung der Bodenerosion, um den Ausgleich des Wasserabflusses, die Herabsetzung der Windgeschwindigkeit, den Schutz vor Lawinenanbrüchen aus dem Innern des Waldes, die Reinhaltung des Grundwassers sowie um die regelmässige Speisung von Quellen hochwertigen Trinkwassers. Erst in neuerer Zeit wird man sich indessen bewusst, welche wichtige Bedeutung der Wald auch für den Landschafts- und Naturschutz besitzt. Zusammen mit den Kleingehölzen trägt er wesentlich zur Erhaltung vielfältiger Landschaftsstrukturen bei, verhindert als stabiles Landschaftselement den grossflächigen Zusammenschluss von Siedlungen und verblieb in grossen Landschaftsteilen oft als einziger naturnaher Lebensraum für Pflanzen und Tiere.

Als Erholungsraum unterliegt der Wald einer zunehmenden Beanspruchung. Arbeitszeitverkürzung, Motorisierung, Erschliessung der Landschaft sowie ungünstige Veränderungen in der Wohn- und Arbeitswelt lassen die Nachfrage nach einem Ausgleich in der freien Natur ständig anwachsen. Wälder gehören deshalb heute zu den beliebtesten Gebieten für die Nah- und Wochenenderholung und fördern Tourismus und Ferienaufenthalt. Diese wichtige, soziale Waldfunktion ist durch das schweizerische Zivilgesetz aus dem Jahre 1912 ausdrücklich gewährleistet, [illegible]s Betreten des Waldes und die Aneignung von wildwachsenden Beeren und Pilzen je[illegible] in ortsüblichem Umfang gestattet ist.

2 Tierökologische Auswirkungen der Waldstruktur

Der Begriff «Biotop» umfasst die abiotischen Faktoren eines Lebensraumes, im wesentlichen Boden und Klima. Bezieht man den Ausdruck «Biotop» aber ausschliesslich auf Tiere, gehören auch die Pflanzen als wesentlicher Bestandteil der Lebensstätten dazu. Die Vögel mit ihrer grossen Artenzahl und ihren differenzierten Lebensansprüchen sind besonders dazu geeignet, die Einflüsse verschiedenartiger Vegetationselemente aufzuzeigen.

2.1 Der naturnahe Wald – ein Lebensraum grossen Artenreichtums

Im Vergleich mit den Lebensräumen des offenen Kulturlandes zeichnet sich der Wald durch eine grosse Vielfalt von Lebewesen aus. Allein in den Buchenwäldern Mitteleuropas wurden rund 4000 Pflanzenarten und 7000 Tierarten festgestellt, davon mehr als 350 Einzeller, mehr als 380 Würmer, 70 Landschnecken, 560 Spinnen und Bärtierchen, 26 Asseln, 60 Tausendfüssler, 5200 Insekten und 109 Landwirbeltiere.

Für die Mannigfaltigkeit der Tierwelt sind die Zahl der Pflanzenarten und die räumliche Gliederung der Vegetation von entscheidender Bedeutung. Die Tiergemeinschaften reagieren deshalb sehr ungünstig auf die Umwandlung naturnaher Wälder in standortsfremde Monokulturen. Diese Feststellung gilt vor allem für die Laubwaldgebiete der tieferen Lagen und wurde wiederholt mit Bestandesaufnahmen von Brutvögeln belegt. Das folgende Beispiel zweier benachbarter Probeflächen auf einem einheitlichen Standort des Eichen-Hagebuchenwaldes zeigt, dass 14 von insgesamt 27 Vogelarten des Eichenwaldes im Fichtenwald nicht brüten, weil sie in hohem Mass an Laubwald gebunden sind (R. Schäck, 1981). Die Erhaltung naturnaher Wälder ist ein Grunderfordernis für einen wirkungsvollen Biotopschutz.

2.2 Vielfalt der Naturwälder

H. Ellenberg und F. Klötzli (1972) haben für die Schweiz die grosse Zahl von 71 verschiedenen Waldgesellschaften beschrieben. Diese ausserordentliche Mannigfaltigkeit unserer Naturwälder ist bedingt durch die vielseitigen Unterschiede, welche Klima, Boden, Kleinrelief und Exposition in unserem Lande aufweisen.

Jede Waldgesellschaft bildet den Lebensraum einer charakteristischen Tiergemeinschaft. Je extremer die Klimabedingungen sind und je einseitiger die Waldvegetation zusammengesetzt ist, um so mehr vermindert sich die Zahl der vorhandenen Tierarten (W. Tischler, 1976). Diese allgemein gültige Gesetzmässigkeit zeigt sich wiederum deutlich im Häufigkeitsgefüge der Brutvögel.

Mit zunehmender Höhenlage nimmt die Häufigkeit der Brutvogelarten auch unter natürlichen Bedingungen deutlich ab, und zwar wesentlich ausgeprägter als die Zahl der Individuen. Trotz der verminderten Artendichte sind aber die Waldgesellschaften höherer Lagen für die Erhaltung der Tierwelt von grossem Wert, weil dort häufig charakteristische, seltene oder gefährdete Arten leben. Als Beispiele seien genannt: Rauhfusskauz, Sperlingskauz, Auerhuhn und Haselhuhn.

2.3 Altholzbestände – ein bedeutsames Strukturelement

Im Wirtschaftswald sind viele an Alt- und Totholz angepasste Tierarten selten geworden oder gefährdet, weil ein unzureichender Bestand von wirtschaftlich überalterten, absterbenden oder abgestorbenen Bäumen vorhanden ist.

Das Blatt- und Astwerk sowie der Stamm- und Wurzelraum von alten und zerfallenen Bäumen, stehendes und liegendes Totholz bieten vielen rinden-, holz- und moderfressenden Wirbellosen Nahrungs- und Entwicklungsraum. Diese Tiere bilden zusammen mit dem Samenertrag der Bäume für manche Vögel und Säugetiere während des ganzen Jahres eine reichhaltige Nahrungsquelle. In den durch Blitzschlag, Fäulnis oder durch die Tätigkeit der Spechte entstehenden Spalten und Naturhöhlen finden ausserdem Edelmarder, zahlreiche höhlenbrütende Vögel, Schläfer, baumbewohnende Fledermäuse, Hornissen und andere Tierarten geeignete Ruhequartiere und Fortpflanzungsstätten.

Eindrücklich zeigt die Vogelwelt die eminent wichtige Bedeutung der Altholzbestände für die Artenvielfalt. Nach einer Studie, die in den Eichenwäldern Burgunds ausgeführt worden ist (B. Frochot, 1971), verteilten sich die insgesamt 46 aufgefundenen Brutvogelarten sehr ungleich auf die verschiedenen Altersklassen des Waldes.

Wie dieser Befund zeigt, liegt das Schwergewicht der Brutvogelarten deutlich innerhalb der Altholzbestände, die bemerkenswerterweise die spärlich vertretenen Arten im besonderen Mass begünstigen. Jungwaldflächen fehlen im Wirtschaftswald nie, oftmals dagegen stabile Altholzbestände.

2.4 Räumliche Gliederung der Waldvegetation

Die waldbewohnenden Tiere nutzen die Vegetation für die unterschiedlichsten Bedürfnisse, wie etwa als Träger von pflanzlichen oder tierischen Nahrungsbestandteilen, als Ruhequartier und Fortpflanzungsstätte, als Sing- oder Ansitzwarte sowie als Schutz vor extremen Klimaeinflüssen und vor Feinden.

Manche Tiere sind anspruchslos und können wie der Buchfink sämtliche Waldformationen bewohnen. Andere Tierarten dagegen haben spezifische Ansprüche entwickelt. Es gibt Vogelarten, die sich in Dickungen (Zilpzalp), in Stangenhölzern (Rotkehlchen) oder in Altholzbeständen (Schwarzspecht) ansiedeln, und andere, die an ganz bestimmte Vegetationselemente gebunden sind, wie der Mittelspecht an die Eiche oder der Gartenbaumläufer an grobborkiges Starkholz. Die ausgesprochenen Spezialisten brauchen sogar auf verhältnismässig kleiner Fläche eine Vielzahl besonderer Requisiten. Ein Beispiel dafür ist das Haselhuhn, das in seinem individuellen Lebensraum ausserordentlich dichte Stangenhölzer als Schlafplatz und Versteck, geeignete Brutplätze und Singwarten, Weichhölzer für die winterliche Knospenäsung, Huderpfannen und insektenreiche Lichtungen zur Kükenaufzucht benötigt.

Der Wald ist in der Vertikalen in Boden-, Kraut- und Strauchschicht unterteilt, darüber folgen der Stammraum und der Kronenraum der Baumschicht. Er unterliegt auch in horizontaler Richtung einer ausgeprägten Gliederung, bedingt durch die wechselnde Vertretung der Baumarten und Waldentwicklungsstufen. Die Waldstruktur spielt für die Artenvielfalt der Tiere eine hervorragende Rolle. Je vielseitiger und kleinflächiger die Vegetation den Wald räumlich gliedert, um so besser vermag er den unterschiedlichsten Ansprüchen spezialisierter Tierarten zu genügen.

Mit insgesamt 55 festgestellten Vogelarten auf 85 ha bestätigt eine Aufnahme in einem naturnahen Eichen-Hagebuchenwald den ungewöhnlich grossen Artenreichtum dieser Lebensstätte (U. N. Glutz von Blotzheim, 1962). Sie enthält vor allem auch viele, nur spärlich vertretene Arten. Diese besitzen entweder eine weiträumige Siedlungsstruktur, oder aber sie stellen besondere Lebensansprüche, die nur auf beschränktem Raum erfüllt werden können. All diese «seltenen» Vogelarten sind aber nicht bedroht, solange dieser naturnahe Lebensraum keine grundlegende Umformung erfährt.

2.5 Kontaktzone zwischen Kulturland und Wald

Waldränder sind bedeutsam für das Landschaftsbild sowie als vorbeugender Schutz des Waldes vor Sturmschäden und intensiver Sonneneinstrahlung. Sie stellen aber auch einen Lebensraum besonderer Prägung dar. Bild 1 zeigt das Profil eines ökologisch zweckdienlich aufgebauten Waldrandes, dessen gesamte Breite etwa 30 m beträgt. Vorgelagert sind ein Waldsaum aus Gräsern und Kräutern sowie eine Zone aus Sträuchern und einzelnen Baumarten zweiter Grössenordnung, wie Vogelbeeren, Aspen oder Hagebuchen. Hernach folgt der eigentliche Waldmantel mit einem stufigen Aufbau aus Sträuchern, Nebenbestandesbäumen und sturmfesten Baumarten. Erst dahinter befindet sich der Wirtschaftswald. Die Waldstrasse liegt zwischen Waldmantel und Wirtschaftswald, damit beide Waldteile ohne bedeutsame Beeinträchtigung durch die Holzbringung gepflegt werden können.

Die Eigenart des Waldrandes als «äussere Grenzlinie» besteht darin, dass hier die Pflanzen- und Tierarten des offenen Landes und des Waldes zusammentreffen. Waldbewohnende Tiere nutzen das Nahrungsangebot im offenen Land, während umgekehrt Feldtiere von der Baum- und Strauchvegetation profitieren.

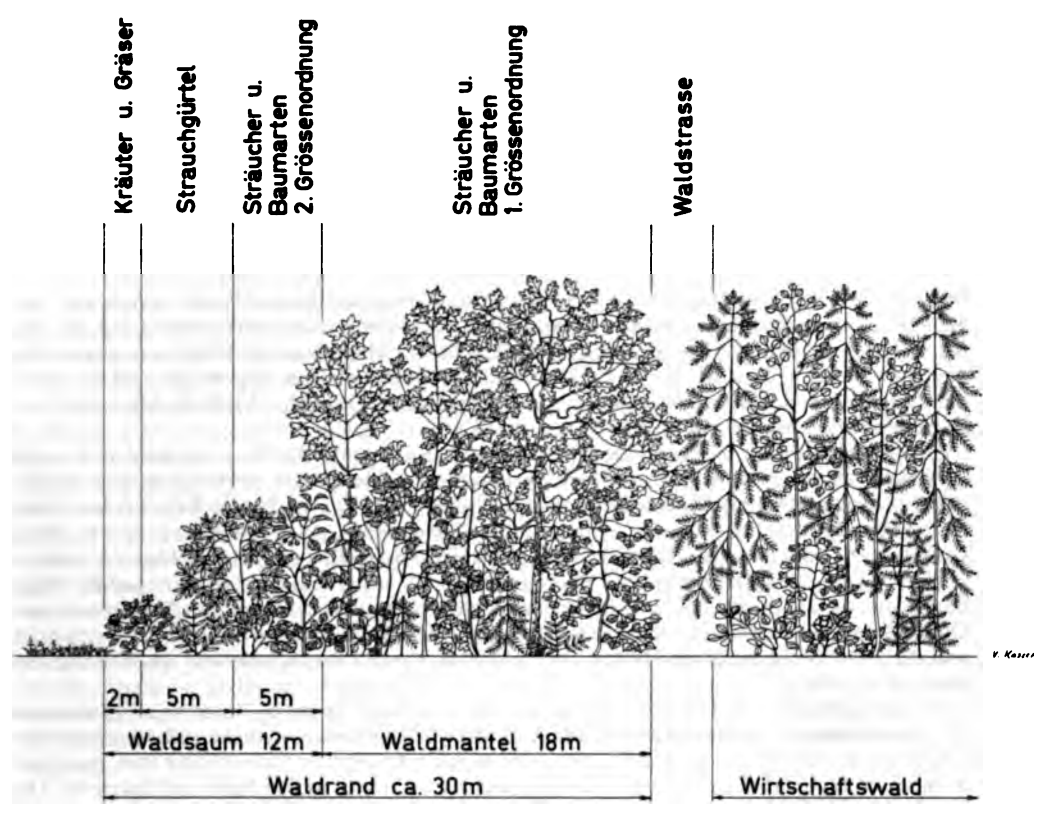


Bild 1 Ideales Waldrandprofil

Waldränder geeigneter Struktur tragen wie Feldgehölze und Hecken dazu bei, charakteristische Tierarten des offenen Landes zu erhalten. Sie bilden heute vielenorts ein eigentliches Refugium für die aus dem intensiv bewirtschafteten Kulturland verdrängten Pflanzen und Tiere.

Zahlreiche Schmetterlinge und Käfer, hügelbauende Ameisen, Blindschleichen, Zauneidechsen und der Igel gehören dazu.

Auch das Reh nutzt die Strauchvegetation des Waldrandes intensiv, ohne dadurch forstlichen Schaden zu verursachen.

2.6 Innere Grenzlinien

Im Wald existieren auch «innere Grenzlinien». Sie kommen dadurch zustande, dass unterschiedliche Waldbestände – wie Altholz und Jungwald – mit deutlich abgesetzten Baumhöhen aneinander grenzen.

Der förderliche Effekt der inneren Grenzen auf die Artenvielfalt der Tiere wurde in zwei Erlenbruchwäldern Niedersachsens anhand der Brutvogelbestände nachgewiesen (F. Dierschke, 1951). Bei der ersten Fläche handelt es sich um einen Wald, der alle Waldentwicklungsstufen vom Jungwuchs bis zum 40jährigen Baumholz enthält, beim zweiten Untersuchungsobjekt vorwiegend um ein 20- bis 30jähriges, gleichförmiges Stangenholz. Dementsprechend war auch die Länge der Bestandesränder sehr unterschiedlich ausgeprägt und betrug im einen Fall 100 m pro ha, im anderen dagegen nur 10 m pro ha. Sowohl bei der Siedlungsdichte als auch bei der Artenzahl zeigte sich der günstige Einfluss der inneren Grenzlinien.

Dieser Befund beruht darauf, dass es Vogelarten gibt, die in stärkerem Mass an bestimmte Waldentwicklungsstufen gebunden sind. Daneben existieren aber auch Arten, die sich vorzugsweise im Bereich von Bestandesrändern ansiedeln (N. Koch, 1975). Auch Säugetiere können von den «inneren Grenzlinien» profitieren. Durch eine kleinflächige Waldverjüngung bilden sich lange Randbereiche zwischen Dickung und Jungwuchs aus, so dass das Reh Deckung und Äsung in unmittelbarer Nachbarschaft nebeneinander vorfindet. Es ist hier in der Lage, die äsungsreichen Jungwüchse ohne grossen Energieaufwand zu nutzen und sich allfälligen Störungen mit kurzen Fluchtdistanzen zu entziehen.

2.7 Waldtiere als Teilsiedler

Manche Tiere besitzen zwar ihre Wohn- und Fortpflanzungsstätten im Wald, suchen aber die Nahrung zumindest während gewisser Jahreszeiten ganz oder teilweise im offenen Land. Zu diesen Tierarten zählen beispielsweise Rothirsch, Reh, Fuchs, Mäusebussard, Waldohreule oder Fledermäuse. Biber und Graureiher sind neben dem Wald auf Gewässer angewiesen, und das Birkhuhn, das im Bereich des subalpinen Zwergstrauchgürtels lebt, benötigt Lärchen, Arven oder Vogelbeeren für die winterliche Ernährung.

In all diesen Fällen setzt sich der Lebensraum der einzelnen Tierart aus verschiedenen Landschaftselementen zusammen, so dass ihre Bestandesentwicklung stark vom Umfeld des Waldes abhängen kann. Die freilebenden Huftiere, wie Wildschwein, Rothirsch oder Reh, werden durch das reichhaltige Nahrungsangebot gefördert, das sie auf dem landwirtschaftlich genutzten Areal vorfinden. Andere Tierarten dagegen leiden unter der durch Düngung, Insektizide und Saatgutreinigung bewirkten Verarmung von Flora und Fauna – insbesondere insektenfressende Vögel und Fledermäuse. Auch anderweitige Einflüsse wirken sich zum Nachteil von Teilsiedlern aus. Durch die Melioration von Feuchtwiesen verliert der Wespenbussard ein bevorzugtes Jagdgebiet, und durch die Beseitigung von Hecken und Feldgehölzen wird der Beuteerwerb des Habichts bedeutend erschwert.

Es gibt ausserdem Waldtiere, bei denen grössere Teile der Population ihren Standort während der Vegetationszeit ins offene Land verlegen, das Reh beispielsweise in deckungsreiche, landwirtschaftliche Kulturen oder der Rothirsch auf die Weiden der alpinen Stufe. Dieser Biotopwechsel ist indessen zeitlich befristet, da die Tiere regelmässig im Herbst in den Wald zurückkehren. Die hier vorhandenen Verbisspflanzen, die auch bei Schnee erreichbar sind, sind dann für das Wild lebenswichtig.

2.8 Urwald-Wirtschaftswald

Urwaldgebiete verfügen über umfangreiche Altholzbestände mit grossen Holzvorräten, und ihre Entwicklung folgt einer eigenen Dynamik (H. Leibundgut, 1982). Werden Urwaldbestände durch Feuer, Sturm oder Insekten grossflächig zerstört, stellt sich zunächst ein Vorwald aus lichtbedürftigen Pionierbaumarten (Aspen, Birken) ein, der später von schattenertragenden Baumarten unterwandert wird. Meistens erneuern sich Urwälder jedoch auf kleineren Flächen. Je nach der Geschwindigkeit, mit welcher die Altholzbestände zerfallen, entstehen entweder gruppenförmige oder aber stufig aufgebaute Jungwälder. Die Mannigfaltigkeit möglicher Strukturtypen ist gross und umfasst unregelmässig-stufige bis ausgeprägt gleichförmige Waldbestände.

Im Wirtschaftswald wird die Waldstruktur dagegen vorwiegend durch die angewandte Verjüngungstechnik geprägt. Im Laubwaldgebiet wurde bereits im 13. Jahrhundert der Niederwaldbetrieb eingeführt. Das damit erzeugte Brennholz bezog man mit flächenweisen Kahlhieben, und der neue Bestand wurde ausschliesslich von Stockausschlägen gebildet. Der Mittelwald vereinigt die Merkmale des Hoch- und Niederwaldbetriebes. Das Unterholz besteht aus Stockausschlägen, das Oberholz für die Nutzholzproduktion dagegen aus Kernwüchsen, die aus Samen hervorgegangen sind. Niederwald und Mittelwald begünstigten die Existenz einzelner Tierarten. Das Haselhuhn fand ehemals in der dichten Hauschicht gute Lebensbedingungen, und der Mittelspecht profitiert noch heute von den starken Eichen-Oberständern des ehemaligen Mittelwaldes. In der Schweiz hat man schon vor mehreren Jahrzehnten mit der Umwandlung des Mittelwaldes in

Hochwald begonnen. Der Hochwald besteht ausnahmslos aus Kernwüchsen, und seine Struktur ergibt sich aus den vorherrschenden Verjüngungsverfahren. Die für den Artenreichtum der Tierwelt vorteilhaftesten Betriebsarten sind die Plenterung und der kleinflächige Femelschlag, die beide auch bezüglich Schutzfunktionen die günstigsten Wirkungen aufweisen.

2.9 Flächengrösse

Waldökosysteme sind von Natur aus grossflächig ausgebildet, und dementsprechend gibt es viele Tiere, die hohe Anforderungen an die Ausdehnung der Lebensräume stellen. Besonders hohe Flächenansprüche haben Tierarten mit grossen Revieren (Luchs) oder mit weiträumigen Aufenthaltsgebieten (Rothirsch). Auch spezialisierte Tierarten gehören dazu. So benötigt beispielsweise der Mittelspecht eine Reviergrösse von rund 10 ha, und eine lebensfähige Population beansprucht 40 bis 100 ha Eichenwald. Noch grösser ist der Raumanspruch des Auerhuhns, bei dem die Reviergrösse einer Henne 45 ha beträgt und die Minimalfläche einer Population 1000 ha lichte Starkholz- oder Plenterbestände umfasst.

Nach J. Reichholf (1980) beträgt das Minimalareal für die Erhaltung der charakteristischen Avifauna in einer naturnahen Lebensstätte Mitteleuropas etwa 70–80 ha. Dieser Raum ist notwendig, um ungünstige Randeinflüsse von benachbarten Flächen auszuschalten und eine ausreichende Vielfalt von Kleinstrukturen zu gewährleisten (Starkholz, Totholz, Naturhöhlen, Lichtungen, usw.). Ein grösserer Komplex naturnahen Waldes vermag demzufolge mehr Tierarten zu erhalten als die gleiche Fläche aufgeteilt in mehrere Areale.

Für den Biotopschutz im Wald bedeutet dies konkret, dass die verhältnismässig kleinen, zusammenhängenden Waldkomplexe in der Kulturlandschaft nicht durch Rodungen verkleinert und dass sie ausserdem als Ganzes in einer naturnahen Verfassung erhalten werden sollten. Überall dort, wo uns die frühere Bewirtschaftung naturferne Waldbestände hinterlassen hat, bedeutet ihre allmähliche Umwandlung in einen naturnahen Zustand für die Tierwelt einen erheblichen Gewinn. Diese Feststellungen mindern den ökologischen Wert von Einzelbäumen, Hecken und anderen Kleingehölzen in keiner Weise. Diese erfüllen im offenen Land eine eigenständige Funktion durch die Bewahrung spezifischer Tierarten wie etwa Rotrückenwürger oder Steinkauz.

3 Ziele und Massnahmen des Biotopschutzes im Wald

3.1 Allgemeine Zielvorstellungen

Naturnahe Lebensstätten finden sich im offenen Kulturland nur mehr in den von Entwässerungen verschonten Feuchtgebieten, entlang weniger See- und Flussufer, auf anthropogen stark gefährdeten Trockenstandorten und auf ertraglosen Flächen. Als Folge davon sind dort schon viele Pflanzenarten ausgestorben und Tierarten mit besonderen Lebensansprüchen selten geworden.

Die Wälder können diese Verluste nicht ersetzen, sie stellen aber heute in grossen Landschaftsteilen die letzten naturnahen Lebensstätten dar. Es besteht deshalb die ethische Verpflichtung, dafür zu sorgen, dass nicht noch zusätzlich der Wald durch naturfremde Massnahmen Teile seiner reichhaltigen und charakteristischen Lebewelt verliert. Von der rasch fortschreitenden Verarmung der Pflanzen- und Tierwelt ist auch das Waldareal erfasst. In der Bundesrepublik Deutschland sind von den waldbewohnenden Säugetieren 6 Arten ausgestorben und 32 Arten gefährdet; bei den waldbewohnenden Vögeln verzeichnen die Roten Listen 7 ausgestorbene und 49 bedrohte Arten.

Die Schädigung der Lebensräume bildet die Hauptursache für diesen alarmierenden Artenschwund. Es kommt deshalb sehr darauf an, dass man den Lebensraum «Wald» bewusst pflegt und anerkennt, dass die Anliegen des Naturschutzes den Verzicht auf uneingeschränkte Leistungen in den Bereichen der Ertrags- und Erholungsfunktion erfordern.

Das primäre Ziel der Biotop-Pflege im Wald ist die Erhaltung naturnaher Lebensgemeinschaften. Dieses Ziel ist nur mit einem naturnahen Waldbau zu erreichen, dessen wesentliche Merkmale darin bestehen, dass eine hinreichende Vertretung der standortsheimischen Baumarten

erhalten bleibt und eine wertvolle Starkholzproduktion mit gesunden und stabilen Waldbeständen angestrebt wird. Die Walderneuerung erfolgt – den örtlichen Verhältnissen angepasst – ohne schematische räumliche Ordnung wenn immer möglich auf dem Weg der Naturverjüngung. In diesem Zusammenhang wesentlich ist auch die Feststellung, dass nach der neuen Stoffverordnung aus dem Jahr 1986 die Verwendung von Pflanzenschutz- und Unkrautvertilgungsmitteln im Walde und am Waldrand einer Ausnahmebewilligung bedarf.

3.2 Bewertungskriterien

Es gibt forstliche Lebensstätten, die für den zoologischen Artenschutz besonders wertvoll sind und die deshalb bei der Planung biotop-pfleglicher Massnahmen vordringlich berücksichtigt werden sollten. Massgebend dafür sind insbesondere die folgenden Merkmale:

- Vorkommen gefährdeter oder seltener Tierarten
- Hohe Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen von natürlichen Standortsfaktoren (z.B. Entwässerungen, Flusskorrektionen)
- Von Natur aus nur auf kleinen Arealen vertreten
- Natürliche Vegetation durch menschlichen Einfluss grösstenteils verändert
- Spezifische Standortsbedingungen für gewisse Vogelarten, Amphibien, Reptilien oder Insekten

Die Tabelle 1 vermittelt eine kurze Übersicht über derartige Waldformationen. Ausserdem gibt es im Waldareal eine grössere Zahl von schutzbedürftigen Kleinbiotopen, wie Weiher, Bachläufe, Quellen, Röhrichte, Riedflächen, Feuchtwiesen, Trockenrasen oder Waldwiesen.

Tabelle 1
Für den Faunenschutz besonders wertvolle Waldformationen (Arbeitskreis forstliche Landespflege, 1984)

Waldformation	Beispiele
Nass- und Feuchtwälder	Auenwälder, Bruchwälder, Moorwälder
Wärmeliebende Laubwälder	Flaumeichenwälder, trockenheitsertragende Eichen-Mischwälder, Orchideen-Buchenwälder
Natürliche Föhrenwälder	Pfeifengras-Föhrenwälder
Ahorn- und eschenreiche Mischwälder	Ahorn-Eschenwälder, Bacheschenwälder, Hirschzungen-Ahorn-Schluchtwälder
Waldgesellschaften mit natürlichem Vorkommen der Weisstanne	Tannen-Buchenwälder, Fichten-Tannenwälder
Historische Waldnutzungsformen	Niederwald, Mittelwald, Eichenwald im Areal der Rotbuchenwälder
Reife Waldökosysteme	Altholzbestände mit Totholz

...gen und Konflikte

...igenart forstlicher Lebensstätten können durch folgende Faktoren wesentlich be... Blab, 1986):

...: Luftschadstoffe gefährden heute den Wald in hohem Mass. Im Schwei... ...hre 1986 durchschnittlich 52 Prozent der Nadelbäume und 45 Prozent der

Laubbäume geschädigt. Es handelt sich hier um ein überaus ernsthaftes Umweltproblem, das mit biotop-pfleglichen Massnahmen nicht gelöst werden kann. Nur Sanierungsmassnahmen in allen Bereichen der Luftreinhaltung können Abhilfe schaffen.

Flächenverluste: Durch Verkehrsanlagen und Siedlungsbau entstehen immer wieder empfindliche Flächeneinbussen. Rodungen grösserer Waldflächen in waldarmen Gebieten sind für die Tierwelt ausserordentlich nachteilig und können durch Ersatzaufforstungen in waldreicheren Gegenden nicht vollwertig kompensiert werden. Durch Neuaufforstungen entstehen nicht selten zusätzliche Konflikte mit dem Naturschutz, insbesondere dann, wenn sie auf feuchtem Grünland, Riedflächen, Trockenrasen oder Waldwiesen erfolgen.

Waldbau: Sehr ungünstig auf die Lebensstätten wirken sich standortsfremde Monokulturen aus Fichte, Föhre oder fremdländischen Baumarten aus. Waldbiotope werden aber ebenfalls langfristig geschädigt durch eine grossflächige, einzig auf Kostenersparnis ausgerichtete Holzernte. Sie führt zur Neubegründung von gleichförmigen Waldbeständen, die nur einer beschränkten Zahl von Tierarten Lebensmöglichkeiten bieten. Weitere dauerhafte Beeinträchtigungen sind möglich durch Entwässerungen in feuchten Waldgesellschaften.

Walderschliessung: Eine hinreichende Erschliessung mit Waldstrassen bildet eine unumgängliche Voraussetzung für eine pflegliche Nutzung und eine kleinflächige Verjüngung der Waldbestände. Sofern die Benützung der Waldstrassen keiner Beschränkung unterworfen ist, können sie jedoch wesentlich dazu beitragen, die menschlichen Störungen in den Lebensstätten der Tiere zu vermehren. Dieser Umstand wirkt sich insbesondere bei der Neuerschliessung bisher schwer zugänglicher Waldgebiete aus, die nicht selten Rückzugsgebiete für das störungsanfällige und gefährdete Auerhuhn darstellen.

Wildschäden: Hohe Bestände von Rothirsch, Reh und gebietsweise auch der Gemse verursachen häufig empfindliche Wildschäden. Die vom Rothirsch geschälten Bäume, die von Wundfäule befallen werden, haben grosse Ertragseinbussen für den Waldbesitzer zur Folge und vermindern die Widerstandskraft der Waldbestände gegen Einwirkungen von Sturm und Schnee. Viele ökologisch wertvolle, standortsheimische Baumarten, wie Hagebuche, Esche, Bergahorn, Eiche, Linde oder Weisstanne, die das Wild bevorzugt verbeisst, lassen sich oft nicht mehr im erwünschten, naturnahen Mass nachziehen. Ausserdem ist das Wild durchaus in der Lage, durch intensiven Verbiss seine winterliche Nahrungsgrundlage zu übernutzen. Dadurch kann es auch andere Tierarten konkurrenzieren.

Erholungsbetrieb: Ein rücksichtsloser Erholungsbetrieb kann durch allzu intensive Beunruhigung schwerwiegende Nachteile für empfindliche Tierarten nach sich ziehen. Diese Feststellung gilt insbesondere für häufige Störungen an Horst- und Balzplätzen sowie für grossangelegte Orientierungsläufe während der Brut- und Setzzeit sowie der Aufzuchtperiode. In besonderem Mass betroffen sind Rauhfusshühner und freilebende Wiederkäuer durch das ungeregelte Variantenskifahren und die Anlage von Langlaufloipen in ihren Winteraufenthaltsgebieten. Diese Tierarten haben, bedingt durch solch anhaltende Störungen, einen erhöhten Energiebedarf, sie besitzen dann aber kaum mehr die Möglichkeit, sich normal zu ernähren.

.4 Massnahmen der Biotop-Pflege

Die Wirksamkeit der Biotop-Pflege ist vielfach abhängig von einer sorgfältigen Überprüfung der örtlichen Verhältnisse. Die wichtigsten, biotop-pfleglichen Massnahmen im Wald sind in der folgenden Übersicht zusammengestellt (Arbeiterkreis Forstliche Landespflege, 1984):

- Erhaltung oder auch Wiederherstellung naturnaher Laubmischwälder mit hinreichenden Mischungsanteilen der standortsheimischen Baumarten
- Kleinflächige Waldverjüngung unter Anwendung langer Verjüngungszeiträume. Förderung ungleichförmiger Waldstrukturen
- Erhaltung und zweckdienliche Ausformung der Waldrandzonen. Keine Begradigung
- Einhaltung langer Produktionszeiträume in stabilen Altholzbeständen
- Erhaltung des Nebenbestandes und seltener Baumarten durch die Bestandespflege
- Förderung der Mischbaumarten und Erhaltung der Verbisspflanzen bei der Jungwuchspflege
- Sicherung von Kleinlebensräumen, wie Riedflächen, Moore, Weiher, Trockenrasen usw.

- Horstbäume, Spechtbäume und abgestorbene Bäume nicht entfernen. Keine Gefährdung durch Schadinsekten
- Wurzelteller geworfener und Stümpfe gebrochener Bäume belassen
- Holzschläge, Holzbringung und Jungwaldpflege während der Brutzeit und Aufzuchtperiode unterlassen
- Regulierung der Schalenwildbestände durch jagdliche Massnahmen
- Verbesserung des Äsungsangebotes für das Wild mittels Naturverjüngung und regelmässigen Durchforstungen der Waldbestände
- Berücksichtigung der Lebensräume bedrohter Tierarten bei der Walderschliessung. Sperren der Waldstrassen für den allgemeinen, motorisierten Verkehr
- Keine Neuaufforstungen auf biologisch wertvollen Freilandstandorten
- Entwässerungen in feuchten Waldgesellschaften unterlassen
- Abgrenzung von Ruhezonen in den Winteraufenthaltsgebieten der Rauhfusshühner und des Rotwildes
- Nisthilfen für die Vögel anbieten in Waldgebieten mit wenig Naturhöhlen
- Waldreservate errichten

3.5 Waldreservate

Waldreservate werden errichtet, damit sich eine naturnahe Waldvegetation ohne direkten, menschlichen Einfluss fortentwickeln kann. Die natürliche Eigenart von Boden und Pflanzengemeinschaft will man dadurch auf ausreichend grossen Flächen bestmöglich sicherstellen. Mit der Schaffung von Waldreservaten lässt sich auch die Erhaltung von wirbellosen Tieren, Vögeln und kleinen Säugetieren wirkungsvoll unterstützen.

Vor der Ausscheidung von Waldreservaten müssen die forstrechtlichen und bestandesstrukturellen Voraussetzungen sorgfältig abgeklärt werden. Die Auswahl sollte sich nicht nur auf Spezialstandorte (Trockenwälder, Feuchtwälder) beschränken, sondern nach Möglichkeit auch in jenen Waldgesellschaften erfolgen, die unsere Waldgebiete mehrheitlich prägen.

Naturwaldreservate dienen unbestritten als Zeugen einer weitgehend unbeeinträchtigten Natur in einer zunehmend naturfremden Landschaft. Sie sind aber ausserdem für die forstwissenschaftliche Forschung von grossem Wert, weil der natürliche Lebenslauf der Waldbestände grundlegende Erkenntnisse für eine naturnahe Waldpflege und eine naturnahe Waldverjüngung vermitteln kann. Durch den Fachbereich Waldbau des Institutes für Wald- und Holzforschung an der ETH Zürich werden gegenwärtig 33 Waldreservate mit einer Gesamtfläche von 1100 ha wissenschaftlich betreut.

4 Literatur

Arbeitskreis forstliche Landespflege (1984): Biotop-Pflege im Wald. Ein Leitfaden für die forstliche Praxis. KILDA-Verlag, Greven. 230 Seiten.

Blab, J. (1986): Grundlagen des Biotopschutzes für Tiere. Erweiterte Neubearbeitung. KILDA-Verlag, Greven. 257 Seiten.

Eiberle, K. (1979): Beziehungen waldbewohnender Tierarten zur Vegetationsstruktur. Schweiz. Z. Forstwes., *132*, 3: 201–224.

Ellenberg, H. und Klötzli, F. (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt., *48*, 4: 589–930.

Frochot, B. (1971): Ecologie des oiseaux forestiers de Bourgogne et du Jura. Thèse présentée à l'université de Dijon, Dijon. 144 pages.

Glutz von Blotzheim, U.N. (1962): Die Brutvögel der Schweiz. Verlag Aargauer Tagblatt AG, Aarau. 648 Seiten.

Koch, N. (1975): Ökologische Beziehungen zwischen den Vögeln und den Biotopen des Üetliberges und des Reppischtales bei Zürich. Viertelj. Natf. Ges. in Zürich, *120*, 4: 299–428.

Leibundgut, H. (1982): Europäische Urwälder der Bergstufe. Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart. 308 Seiten.
Leibundgut, H. (1983): Der Wald – eine Lebensgemeinschaft. 3., erweiterte Auflage. Verlag Huber, Frauenfeld und Stuttgart, 212 Seiten.
Leibundgut, H. (1985): Der Wald in der Kulturlandschaft. Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart. 206 Seiten.
Reichholf, J. (1980): Die Artenarealkurve bei Vögeln in Mitteleuropa. Anz. Orn. Ges. Bayern, *19:* 13–26.
Schäck, R. (1981): Untersuchungen zur Siedlungsökologie der Vögel in einem naturnahen Waldgebiet. Beitr. zur Avifauna des Rheinlands, *14:* 111 Seiten.
Tischler, W. (1976): Einführung in die Ökologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart und New York. 307 Seiten.

Prof. Dr. Kurt Eiberle, Institut für Wald- und Holzforschung, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Buchbesprechung

Harald Schill: Triebbildung, Verzweigungsverhalten und Kronenentwicklung junger Fichten und Lärchen – Birkhäuser Verlag, Basel. 1989. 157 S., sFr. 48.–.

Im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden zeigt es sich immer deutlicher, dass wir viel zu wenig wissen über die natürlichen Erscheinungsformen unserer Bäume und ihre Variabilität. Aus diesem Grunde ist jede morphologische Untersuchung zu begrüssen. Wie im Titel erwähnt, geht es um die Morphologie junger Fichten und Lärchen. Der Autor beschreibt die Triebbildung und konzentriert sich dabei auf Syllepsis und Prolepsis. Er behandelt aber auch endogene und exogene Einflüsse (Standortsfaktoren, Insektenbefall) und stellt Relationen her zwischen verschiedenen Wachstumsparametern. Eine ausführliche Diskussion sowie eine Zusammenfassung in deutscher und englischer Sprache runden das Werk ab.

Es ist ausserordentlich schwierig, morphologische Strukturen mit Worten zu beschreiben. Die Materie wirkt trocken, und es besteht die Gefahr, dass der Leser die Übersicht verliert. Deshalb liest man in diesem Buch mit Vorteil zuerst die Zusammenfassung und erst nachher die einzelnen Kapitel im Haupttext. Der vielversprechende Titel und die sehr interessanten Aussagen in der übersichtlichen Zusammenfassung wecken hohe Erwartungen. Ein genaues Studium der einzelnen Kapitel des Haupttextes wirkt allerdings ernüchternd: Das Buch hält nicht, was es verspricht.

- Bei den im Titel angekündigten Themen «Verzweigungsverhalten» und «Kronenentwicklung» handelt es sich effektiv um einige Aspekte des Austreibens und der Verzweigung von jungen Fichten und Lärchen auf zwei Standorten. Eine derartige Untersuchung ermöglicht keine grossen Aussagen über «inner- und zwischenartliche Variabilität» (S. 129).
- Aussagen über endogene Einflüsse beschränken sich meist auf Vermutungen, die in der Regel weder durch Resultate noch durch Literaturzitate untermauert werden.
- Aussagen über den klimatischen Einfluss stützen sich auf Beobachtungen während einer einzigen Vegetationsperiode.
- Grundprinzipien der Verzweigung von Fichte und Lärche bleiben zum Teil unerwähnt. So ist z.B. die Aussage über Lärche auf S. 29 «Am vorjährigen Langtrieb entwickeln sich aus der Endknospe sowie aus Seitenknospen im oberen Langtriebabschnitt wiederum Langtriebe» unpräzis und verwirrend. Bei der Lärche entsteht aus jeder «regulär» austreibenden vegetativen Knospe ein Kurztrieb. Nach einer mehrwöchigen Pause können sich aus den Endknospen der Kurztriebe Langtriebe entwickeln. Wenn schon auf Prolepsis eingegangen. wird, muss die Tatsache, dass «reguläre» Langtriebe eigentlich proleptisch entstehen, unbedingt erwähnt werden.

Eine morphologische Arbeit verlangt eine äusserst präzise Sprache und die korrekte Verwendung von Fachausdrücken. Der Autor ist in dieser Beziehung nicht konsequent. Als Beispiel mag der Ausdruck «Terminaltrieb» dienen. Ein Terminaltrieb ist der jüngste Jahrestrieb einer Achse beliebiger Verzweigungsordnung. Der Autor bezeichnet aber mit diesem Ausdruck teils die ganze Achse 0. Ordnung, teils nur den jüngsten Jahrestrieb der Achse 0. Ordnung.

Die englische Zusammenfassung wird im Untertitel als «a comprehensive summary in English» aufgeführt. Diese Bezeichnung ist aus zwei Gründen nicht gerechtfertigt: Die Zusammenfassung ist viel zu kurz (viereinhalb Seiten), um «comprehensive» zu sein, und es sind sprachliche Inkonsequenzen und Fehler vorhanden. Letzteres gilt auch für die englischen Legenden. Viele morphologische Fachausdrücke sind ausserhalb des englischen Sprachraumes entstanden und erst vor relativ kurzer Zeit in die englische Sprache aufgenommen worden. Bevor man einen englischen Fachausdruck übernimmt, sollte man abklären, woher er stammt. Wenn man einen neu geschaffenen Ausdruck übernimmt oder selbst einen neuen schafft, muss man das ausdrücklich erwähnen. So würde es z.B. den Rezensenten interessieren, Wachstumsphysiologie ist ihm dieser noch nie begegnet.

Auch wenn das Buch an eigener Substanz bedauerlich wenig enthält, kann es doch als Anstoss für weitere morphologische Untersuchungen dienen.

Markus Sieber

Hinweise für Autoren

Manuskript

.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

.3 Einzelheiten zum Text

.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle ...).

.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 Bilder

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild ...) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich
Jahrgang 135, Heft 2, Juni 1990

Inhalt

Beiträge

Streiflichter aus Wissenschaft und Forschung

Buchbesprechung

Preis Fr. 14.–

Heft 3
Jahrgang 135
September 1990

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
SELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Hinweise für Autoren

1 **Manuskript**

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle ...).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild ...) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135*/3: 129–138

Zur Pathogenese der rheumatoiden Arthritis

Friedrich Hasler, Klinik Valens

Die rheumatoide Arthritis (RA) ist eine komplexe Erkrankung noch unbekannter Ätiologie, wo genetische, hormonelle und immunologische Faktoren interagieren und zu Gelenk- sowie Systemmanifestationen führen. Beide Arme des Immunsystems, der humorale und der zelluläre, sind am Krankheitsprozess beteiligt. Antikörper im Gelenkraum, vor allem Rheumafaktoren (= Antiimmunglobuline), bilden Komplexe mit Antigenen und aktivieren das Komplementsystem. Die resultierende Gelenkentzündung wird dann hauptsächlich verursacht durch polymorphkernige Leukozyten und ihre Produkte. Zellen der chronischen Entzündungsreaktion (Lymphozyten und Makrophagen) infiltrieren das Synovium und produzieren dort lösliche Faktoren, welche weitere Gewebsdestruktionen und Entzündung induzieren. Von wesentlicher pathogenetischer Bedeutung am Krankheitsprozess ist die Interaktion von CD4 positiven Helfer T Lymphozyten mit HLA Klasse II kodierten Glykoproteinen auf der Oberfläche von Antigen präsentierenden Zellen.

Perspectives on the Pathogenesis of Rheumatoid Arthritis

Rheumatoid arthritis (RA) is a complex disease of unknown etiology in which genetic, hormonal, and immunologic factors interact to produce joint and systemic manifestations. Both the humoral and cellular arms of the immune response appear to participate. Locally produced antibodies complex with an inciting antigen, yet to be identified, within the joint and activate the complement system, resulting in articular inflammation mediated primarily by polymorphonuclear leukocytes and their products. Chronic inflammatory cells then produce soluble factors that induce both tissue destruction and inflammation. RA is an example of a disease in which the central immune recognition event involves CD4 lineage helper T cells interacting with polymorphic class II HLA molecules.

1 Einleitung und klinisches Bild

Für das Verständnis der Pathogenese der rheumatoiden Arthritis (RA) ist die Kenntnis der Veränderungen der normalen Gelenkarchitektur durch diese Erkrankung unerlässlich. Die Gelenke werden mit einer dünnen Membran (Synovialis) ausgekleidet, welche aus differenzierten Bindegewebszellen (Synoviozyten) besteht, die auf einem lockeren Stroma sitzen, durch das ein ausgedehntes Netz feiner Kapillaren verläuft. Es wurden zwei Typen von Synoviozyten beschrieben, welche funktionell und morphologisch verschieden sind. Der erste (Typ A Synoviozyt) ist ein Phagozyt und entspricht morphologisch und phänotypisch einer histiozytären Zelle aus der Monozyten-Makrophagenlinie. Der zweite (Typ B Synoviozyt) ähnelt einem Fibroblasten (H.G. Fassbender, 1975). Bei der RA haben wir es mit einem Krankheitsprozess zu tun, welcher dazu führt, dass die zarte Haut der Synovialis zu einem äusserst aggressiven Gewebe umgewandelt wird, welches zentripetal in unsere solidesten Gewebe, Knochen und Knorpel hineinwuchern kann. Röntgenbilder dokumentieren die Gelenkzerstörungen: Gelenkspaltverschmälerung durch Knorpeldestruktion, marginale Erosionen durch Zerstörung der Korti-

kalis, später sind ausgedehntere Zerstörungen mit Achsenabweichung und Ankylose sichtbar. Bild 1 zeigt diese Veränderungen im zeitlichen Ablauf am Beispiel eines Metacarpophalangealgelenkes. Neben der klassischen, symmetrischen und erosiven Gelenkerkrankung können praktisch alle Organsysteme am Krankheitsprozess beteiligt sein. Bei 20% der Patienten finden sich die typischen Rheumaknoten. Diese bestehen aus einer zentralen Nekrose, umgeben von palisadenartig angeordneten Bindegewebszellen, und finden sich nicht nur subkutan, sondern auch in Myokard, Herzklappen, Pleura, Perikard, Skleren usw. Die durch Immunkomplexe verursachte Vaskulitis kann histologisch einer Panarteriitis nodosa gleichen (F. Hasler, 1984).

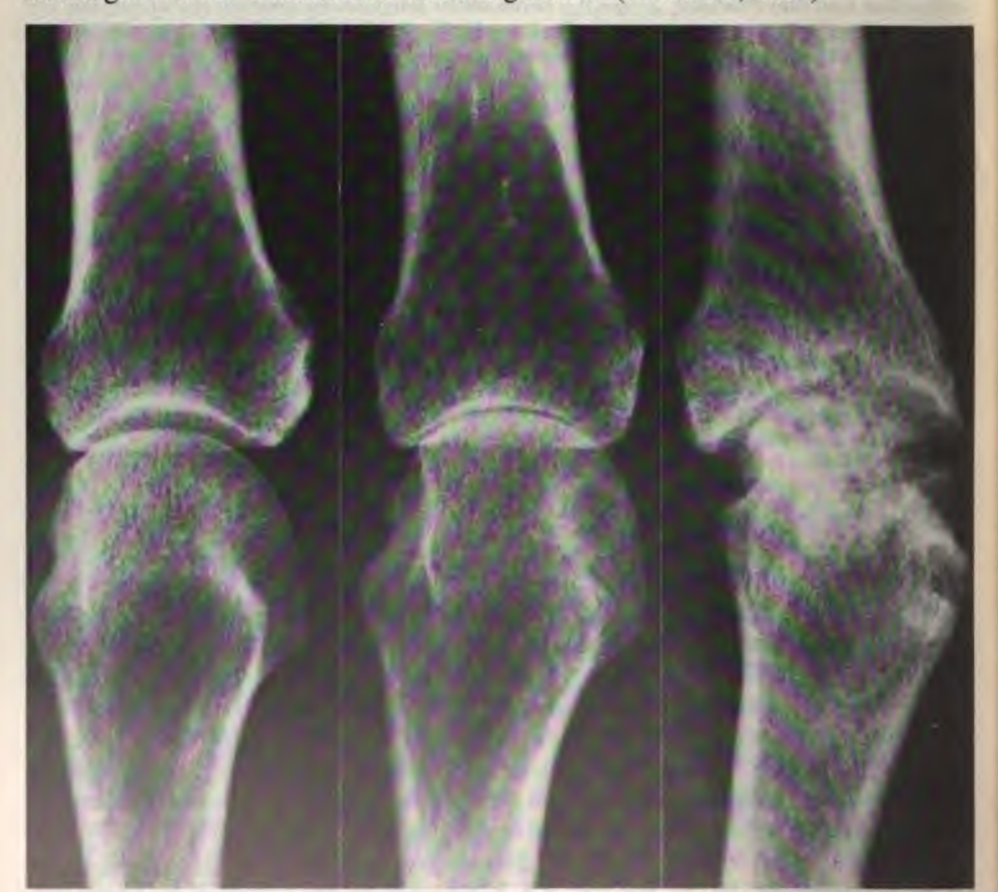


Bild 1 Rheumatoide Arthritis: Progressive Destruktion am Beispiel eines Metacarpophalangealgelenkes. Es kommt zunächst zur Gelenkspaltverschmälerung durch Knorpeldestruktion, schliesslich zu marginalen Erosionen durch Zerstörung der Kortikalis mit Achsenabweichung.

Fig. 1 Rheumatoid arthritis: progressive metacarpophalangeal erosion. Progressive changes can be seen in this metacarpophalangeal joint beginning with joint space narrowing. Then marginal erosion and destruction changes appear with ulnar deviation.

2 Prädisponierende Faktoren und zentrale Immunmechanismen

Unabhängig davon, ob die RA durch endogene oder exogene Pathogene ausgelöst wird, tragen bestimmte Merkmale des Patienten zur Entstehung der Krankheit bei. Dazu gehören Geschlecht und vor allem immungenetische Faktoren. Die RA gehört zu den vielen Autoimmunerkrankungen mit eindeutiger weiblicher Prädominanz. Das Verhältnis weiblicher zu männlichen Patienten variiert zwischen 2:1 und 4:1. Bei der Hashimoto-Thyreoiditis beträgt dieses Verhältnis sogar bis 50:1 und beim systemischen Lupus erythematodes ist es 9:1. Erst unvollständig bekannt sind ferner die Mechanismen, welche dazu führen, dass die Krankheit im letzten Schwangerschaftstrimester in der Regel deutlich bessert und weshalb es nach der Geburt zu neuen Entzündungsschüben kommt. Gammaglobuline aus Plazentagewebe können die entzündliche Aktivität günstig beeinflussen, möglicherweise wegen darin enthaltener Alloantikörper gegen humane Leukozytenantigene (HLA) der Klasse II (M. Moynier, 1987).

In zunehmendem Masse wird heute klar, dass bei der RA die Interaktion zwischen solchen HLA Klasse II kodierten Glykoproteinen auf der Oberfläche von Antigen präsentierenden Zellen mit CD4 positiven Helfer T Zellen eine zentrale pathogenetische Rolle spielt (P. K. Gregersen, 1987). Das Immunsystem besteht aus dem B Zell System und aus den beiden T Zell Systemen der CD8 positiven zytotoxischen sowie CD4 positiven Helfer T Zellen. Ein Antigen wird entweder mit Hilfe von Klasse II HLA Molekülen und dem Rezeptor auf einer CD4 positiven Helfer T Zelle erkannt und verarbeitet (Abbildung 2) oder mittels HLA Klasse I Molekülen und T Zellrezeptoren auf den CD8 zytotoxischen Zellen. Nach R. Winchester (1988) können die autoimmunen Erkrankungen nach diesem Modell klassifiziert werden, in solche mit Dominanz des HLA II CD4 Helfer T Zell Systems bzw. des HLA I CD8 zytotoxischen T Zell Systems (Tabelle 1).

Tabelle 1 Eine Klassifikation der autoimmunen Erkrankungen nach den zentralen Immunantwort-Mechanismen

Table 1 A classification of autoimmune diseases according to critical immune recognition events

HLA Assoziation	Klasse I	Klasse II
T Zell Rezeptoren	CD8	CD4
Serologische Befunde	Fehlen von Autoantikörpern	Autoantikörper sind vorhanden als Ausdruck einer nicht adäquaten Helfer T Zell Funktion
Beispiel	Reiter Syndrom	Rheumatoide Arthritis

Bei der rheumatoiden Arthritis spielt demnach das CD4 System eine Hauptrolle, während bei einer anderen entzündlichen Gelenkerkrankung, der reaktiven Arthritis oder dem Reiter Syndrom, die Interaktion von CD8 T Zellen mit HLA Klasse I Molekülen eine Schlüsselrolle spielt. Nach Ausfall eines funktionsfähigen CD4 Systems bei der Aids-Erkrankung wird die rheumatoide Arthritis gebessert, während die Arthritis des Reiter Syndroms unbeeinflusst bleibt (J.W. Bijlsma, 1988; R. Winchester, 1988). Heute wird bereits versucht, die RA mit monoklonalen Anti CD4 Antikörpern zu behandeln (C. Herzog, 1987).

3 Mögliche Ursachen der rheumatoiden Arthritis

Es ist nicht anzunehmen, dass ein einziges ätiologisches Agens für die Entstehung des Syndroms rheumatoide Arthritis verantwortlich ist. Postuliert werden unter anderem folgende Möglichkeiten:

3.1 Bakterien: Die Ähnlichkeit der synovialen histopathologischen Veränderungen bei RA und Patienten mit Lyme-Disease, wo oft erst nach langer Suche das verantwortliche Agens, die Spirochäte Borrelia burgdorferi, nachgewiesen werden kann, lässt die Möglichkeit noch offen, dass ein bis jetzt nicht bekannter Mikroorganismus eine kausale Rolle spielen könnte (A.C. Steere, 1988).

3.2 Viren: 1975 haben Alspaugh und Tan im Serum von RA-Patienten einen neuartigen Antikörper beschrieben, welcher mit einem Antigen von mit Epstein Barr Virus (EBV) infizierten lymphoblastoiden Zellen reagierte (M. Alspaugh, 1975). EBV-infizierte B Zellen kommen im Blut von RA-Patienten zwar vermehrt vor, allerdings weisen RA-Patienten im Frühstadium der Krankheit keine erhöhten Titer gegen EBV assoziierte nukleare Antigene oder virale Kapsid-Antigene auf (G. Tosato, 1984). Selbst durch sensitivste Techniken liessen sich schliesslich keine EBV-Genome im rheumatoiden Synovialgewebe nachweisen. Diese Techniken hätten eine EBV-Kopie pro 100 Zellen erfasst (R.I. Fox, 1986). Die EBV-Infektion scheint somit eine Folge und nicht eine Ursache der rheumatoiden Arthritis zu sein. Es gibt aber weiterhin Gründe, dieses ubiquitäre Herpes Virus in die Pathogenese, wenn nicht Ätiologie der RA einzuschliessen. So ist das EBV ein potenter polyklonaler B Zell Aktivator, und es ist vorstellbar, dass das Virus auch bei einem anderen Auslösemechanismus zur Perpetuation der Krankheit wesentlich beitragen kann G. Bluestein und F. Hasler, 1984).

ıer gegen Kollagen: Die Immunisierung mit Typ II Kollagen ten und Affen eine Arthritis auslösen. Diese Arthritis kann durch ıen welche Antikollagen-Antikörper enthalten, oder durch Lym-

phozyten erkrankter Tiere passiv transferiert werden (J.M. Stuart, 1982; D.E. Trentham, 1978). Die RA dagegen wird zwar nicht verursacht durch Antikörper gegen Typ II Kollagen, aber die Entzündungsreaktion könnte durch solche Antikörper verstärkt werden, so reagieren monoklonale Antikörper gegen natives Typ II Kollagen mit den Zellen an der Pannus-Knorpelgrenze des rheumatoiden Gelenkes (L. Klareskog, 1986).

3.4 Rheumafaktoren: Es gibt Hinweise dafür, dass Rheumafaktoren zur Amplifikation der rheumatoiden Synovitis beitragen mittels Komplementaktivierung und Bildung von Immunkomplexen, welche von den polymorphkernigen Neutrophilen in der Synovialflüssigkeit phagozytiert werden (H.E. Jasin, 1985). Obwohl sich bei einigen Patienten bereits vor Ausbruch der Erkrankung im Serum Rheumafaktoren nachweisen lassen, ist dies jedoch in der Regel nicht der Fall. Die weitere Analyse der immungenetischen Voraussetzungen für die Rheumafaktorproduktion wird aufzeigen, wie weit diese mit den gleichen Genen assoziiert ist, welche zur Krankheit prädisponieren wie z.B. HLA DR4 (P.F. Merryman, 1989).

4 Die Immunantwort bei der rheumatoiden Arthritis

In diesem Abschnitt werden die zellulären Mechanismen zusammengefasst, welche zur Initiation und Perpetuation der RA beitragen können. Zu den frühesten Veränderungen im Gelenk während den Tagen und Wochen der ersten klinischen RA-Symptome gehört eine Schädigung des Endothels der synovialen Mikrovaskulatur (H.R. Schumacher, 1972). Etwa zur gleichen Zeit wird der ödematöse subsynoviale Raum durch polymorphkernige Leukozyten infiltriert, und Fibrin wird auf der Synovialmembran abgelagert. Man beobachtet auch eine leichte Zunahme der Synoviozytenzahl, aber Lymphozyten und Plasmazellen, welche bei der voll ausgebildeten Erkrankung so zahlreich vorhanden sind, fehlen noch praktisch vollständig. In den folgenden Wochen kommt es zu einem partiellen Verschluss der Mikrozirkulation durch entzündliche Infiltrate und Thromben sowie zur Hyperplasie der Synoviozyten und zur perivaskulären Ansammlung von Lymphozyten (H.R. Schumacher, 1972). Schliesslich können die charakteristischen Merkmale der RA gut erkannt werden: synoviale villöse Hypertrophie, massive Infiltrate von Lymphozyten und Plasmazellen, oft assoziiert mit Lymphknotenbildungen, das Einwachsen eines chronischen Granulationsgewebes (Pannus), welches Knorpel, Knochen, Ligamente und Sehnen erodiert (Bild 1). Die infiltrierenden Lymphozyten sind hauptsächlich CD4 positive Zellen der T Helferklasse (L. Klareskog, 1982).

Folgende hauptsächlich pathogenetische Mechanismen werden nach N.J. Zvaifler (1985) für die Perpetuation der RA postuliert (siehe auch Bild 2):

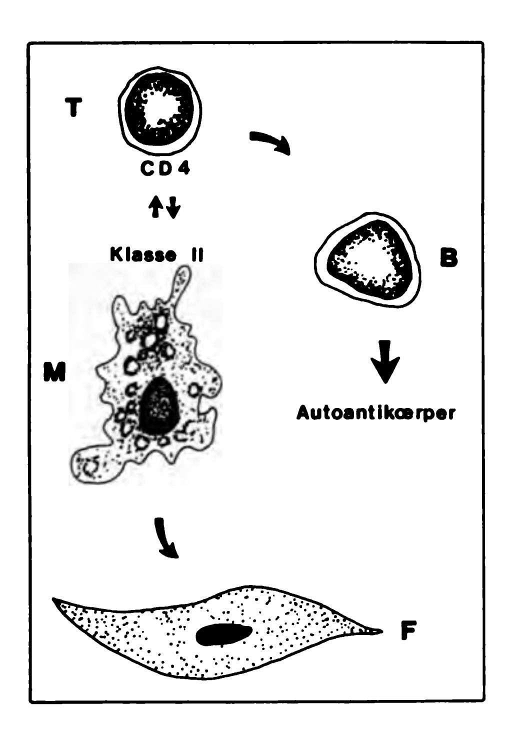


Bild 2 Eine schematische Darstellung der wichtigsten zellulären Mechanismen, welche durch ihre Interaktion zu chronischer Entzündung und Gelenkdestruktion führen (T = T Lymphozyt, B = B Lymphozyt, M = Makrophage, F = Fibroblast).

Fig. 2 A schematic representation of the cellular participants in the joint in rheumatoid arthritis, which, through their interaction, lead to chronic inflammation and tissue destruction.

4.1 Die konventionelle T Zell Immunantwort:

Es wird angenommen, dass die Erkrankung damit beginnt, dass das verantwortliche Antigen aus dem extraartikulären Raum ins Gelenk gelangt. Zu den potentiellen Kandidaten gehören, wie oben erwähnt, Viren, nicht abbaubare Produkte von Bakterien oder Antikörper gegen intraartikuläre Strukturen. Nach der initialen mikrovaskulären Schädigung und Entzündung entsteht der chronisch entzündliche Prozess aus der T Zell Reaktion auf ein persistierendes Pathogen (J.J. Cush, 1987). Diese Hypothese wird durch verschiedene Befunde unterstützt. Das histologische Bild der RA Synovitis gleicht demjenigen von experimentell ausgelösten Immunreaktionen bei Versuchstieren. Ferner sind die Läsionen der Lyme-Arthritis (verursacht durch winzige Mengen von Spirochätenantigenen) der RA histologisch sehr ähnlich (A.C. Steere, 1988). Die T Zellen aus der Gelenkflüssigkeit bei einigen RA-Patienten weisen Oberflächenmoleküle auf, welche auf einen aktivierten Zustand der Zellen schliessen lassen, wie z.B. Ia-Antigen und IL-2 Rezeptor (Y.T. Konttinen, 1983; G.R. Burmester, 1984). Grosse Mengen von Ia lassen sich ebenfalls auf den synovialen Zellen und auf den dazwischenliegenden Makrophagen nachweisen. Die Ia-Antigeninduktion erfolgt hauptsächlich durch Gammainterferon, ein klassisches Lymphokin, welches durch stimulierte T Zellen sezerniert wird (C.F. Nathan, 1983). Die Lymphozyten sezernieren dann eine ganze Reihe anderer Zytokine, welche gemeinsam mit Makrophagen-Produkten die Syn-

oviaproliferation und Differenzierung von B Lymphozyten in Antikörper sezernierende Zellen stimulieren. Die RA Synovitis könnte demnach durch eine typische T Zell gesteuerte Immunantwort erklärt werden. Nicht alle Untersuchungsbefunde unterstützen allerdings dieses Modell. So finden sich bei einigen Patienten mit identischem klinischem Bild im Synovium deutlich mehr CD8 positive T Zellen oder sogar hauptsächlich Fibroblasten und fast keine Lymphozyten (C. L. Young, 1984). Unklar ist auch, weshalb bei einigen Patienten fast keine aktivierten T Zellen im Gelenk gefunden werden (M. Kurosaka, 1983). Die T Lymphozyten aus dem Blut und aus dem synovialen Gewebe der meisten RA-Patienten produzieren schliesslich nur geringe Mengen von IL-2 und Gammainterferon im Vergleich zu normalen Blut T Lymphozyten (F. Hasler, 1983 und 1988, M. Lotz, 1987). Das konventionelle T Zellmodell der rheumatoiden Synovitis muss aufgrund dieser Befunde sicher modifiziert werden.

4.2 Die autoreaktive T Zelle

Das auslösende Pathogen ist in diesem Modell zwar verantwortlich für die Frühveränderungen, muss aber nicht unbedingt auch für die Perpetuation der chronischen Entzündung verantwortlich sein. Durch die Produktion von Lymphokinen während der initialen Immunantwort werden Ia-Antigene auf der Oberfläche von Synovialzellen induziert, welche ihrerseits als Trigger für eine zweite Autoimmunreaktion dienen können. Die Interaktion zwischen diesen Stimulatorzellen und T Lymphozyten wird autologe gemischte Leukozytenreaktion (AMLR) genannt (N. Chiosazzi, 1976). Bei der AMLR proliferieren hauptsächlich die Helfer T Zellen, und es werden auch Lymphokine wie Interleukin-2 und Gammainterferon produziert. Die Gelenkentzündung bei der RA könnte eine solche lokalisierte AMLR darstellen. Zu den potentiellen Stimulatorzellen gehören die Synoviozyten und Makrophagen des Synovialgewebes sowie Ia-reiche dendritische Zellen (N. J. Zvaifler, 1985). Eine Virusinfektion könnte beispielsweise als Adjuvans einer autologen Stimulation dienen, ohne eine primäre Immunantwort gegen sich selbst auszulösen.

4.3 Transformierte Synovialzellen

Bei den bisher aufgeführten Modellen wird den T Lymphozyten eine hauptsächliche Rolle für die Perpetuation des rheumatoiden Entzündungsprozesses zugeschrieben. Produkte dieser Zellen beeinflussen das Endothel der benachbarten Blutgefässe, sind verantwortlich für die Proliferation und Differenzierung der B Lymphozyten und wirken ebenfalls direkt auf Makrophagen und Synoviozyten in ihrer Umgebung. Zu dieser Vorstellung passt allerdings nicht, dass die meisten Mediatoren in der Synovialflüssigkeit nicht von T Lymphozyten produziert worden sind (V. Bergroth, 1989). Aus diesem Grund muss ein drittes Modell in Betracht gezogen werden, nämlich, dass die rheumatoide Synovitis durch Makrophagen und synoviale Fibroblasten zustande kommt und unterhalten wird. Auch synoviale Fibroblasten können Faktoren produ-

zieren, welche die benachbarten Makrophagen zur Expression von Ia-Molekülen an ihrer Oberfläche anregen (V. Bergroth, 1989). Andererseits könnten bereits aktivierte Makrophagen in den Gelenkraum migrieren und hier Fibroblasten zur Proliferation und Sekretion von Kollagenase und Prostaglandinen stimulieren. Zu diesem dritten Modell passen die tierexperimentellen Befunde, wo an Synoviozyten von Ratten bereits biochemische und morphologische Aktivierungsmerkmale nachgewiesen werden können, noch bevor die Adjuvans Arthritis klinisch manifest wird und bevor mononukleäre Zellen in die Synovialmembran infiltrieren (J. P. Lopez-Bote, 1988). Zu den Faktoren, welche von Fibroblasten produziert werden können, gehören GM-CSF (Granulocyte-monocyte colony stimulating factor) und IL-6 (Interleukin-6), während IL-1 und TNF (tumor necrosis factor) zu den von Makrophagen stammenden Zytokinen gehören (J. M. Alvaro-Gracia, 1988). Alle diese zum Teil additiv wirkenden Faktoren lassen sich im rheumatoiden Gelenk nachweisen.

Bei diesem dritten Arthritismodell infiltrieren T Zellen das Gelenk nicht wegen eines spezifischen Antigens, sondern es kommt zur T Zell Einwanderung lediglich unter dem Einfluss löslicher Mediatoren der Synoviozyten. Damit könnte auch die oft nur minimale T Zell Aktivierung und Proliferation erklärt werden. Entsprechend käme die synoviale Antikörperproduktion der B Zellen unter dem Einfluss von IL-6 zustande.

Diese drei Modelle der RA-Pathogenese sind unvollständig, sie schliessen sich auch gegenseitig nicht aus. Nicht erwähnt wurden wichtige Interaktionen zwischen Mastzellen und Fibroblasten, ferner könnten Gefässendothel und B Lymphozyten auch als Antigen präsentierende Zellen wirken. Die Produkte der Synoviozyten- und Makrophagenaktivierung könnten zudem verantwortlich sein für die Suppression einer adäquaten Immunantwort auf ein persistierendes Antigen, wie dies bei der defekten Regulation des Epstein-Barr Virus durch RA T Zellen in vitro nachgewiesen wurde (F. Hasler, 1983). Hier unterdrückten Prostaglandine E und Interleukin-1 Inhibitor die sonst normale Funktion von RA T Lymphozyten.

Welche Modellvorstellung die richtige ist, wird erst entschieden, wenn es gelingt, das oder die auslösenden Pathogene zu identifizieren. Erst dann wird auch eine spezifischere RA-Therapie möglich werden.

5 Literatur

Alspaugh M.A. and Tan E.M. (1975). Antibodies to cellular antigens in Sjögren's syndrome. J. Clin. Invest. *55:* 1067.

Alvaro-Gracia J. M., Firestein G.S., Xu W. D., Taetle R., Zvaifler N.J. (1988), GM-CSF is a major macrophage activating factor (MAF) in rheumatoid synovitis (Abstract). Arthritis Rheum. *31:* 527.

Bergroth V., Zvaifler N.J., Firestein G.S. (1989). Cytokines in chronic inflammatory arthritis. Arthritis Rheum. *32:* 1074–1079.

Bijlsma J.W., Derksen R.W., Huber-Bruning O., Borleffs J.C. (1988). Does AIDS "cure" rheumatoid arthritis? (letter). Ann. Rheum. Dis. *47:* 350–351.

Burmester G.R., Jahn B., Gramatzki M. (1984), Activated T cells in vivo and in vitro: Divergents and expression of Tac and Ia Antigens in the non blastoid small T cells of inflammation and normal T cells activated in vitro. J. Immunol. *133:* 1230–1234.

Bluestein H.G., Hasler F. (1984), Epstein-Barr virus and rheumatoid arthritis. Survey Immunol. Res. *3:* 70–77.

Chiosazzi N.S., Fu M., Kunkel H.G. (1976), Induction of polyclonal antibody synthesis by human allogenic and autologous helper factors. J. Exp. Med. *149:* 1543–1548.

Cush J.J., Lipsky P. (1987), The immunopathogenesis of rheumatoid arthritis: The role of cytokines in chronic inflammation. Clin. Aspects Autoimmunity *1:* 2–13.

Fassbender H.G. (1975), Rheumatoid Arthritis. In: H.G. Fassbender (ed.): Pathology of Rheumatic Disease, chapter 5. Springer, New York.

Firestein G.S., Xu W.D., Townsend K., Broide D., Alvaro-Gracia J., Glasebrook A., Zvaifler N.J. (in press), Cytokines in chronic inflammation arthritis. I. Failure to detect T cell lymphokines (IL-2 and IL-3) and presence of CSF-1 and a novel mast cell growth factor in rheumatoid synovitis. J. Exp. Med.

Fox R.I., Chilton T., Rhodes G. and Vaughan J.H. (1986), Lack of reactivity of rheumatoid arthritis synovial membrane DNA with cloned Epstein-Barr virus DNA probes. J. Immunol. *137:* 498.

Gregersen P.K., Silver J., Winchester R.J. (1987), The shared epitope hypothesis – an approach to understanding the molecular genetics of rheumatoid arthritis susceptibility. Arthritis Rheum. *30:* 1205–1213.

Hasler F., Bluestein H.G., Zvaifler N.J. and Epstein L.B. (1983), Analysis of the defects responsible for the impaired regulation of Epstein-Barr virus-induced B cell proliferation by rheumatoid arthritis lymphocytes: I. Diminished gamma interferon production in response to autologous stimulation. J. Exp. Med. *157:* 173–188.

Hasler F., Bluestein H.G., Zvaifler N.J. and Epstein L.B. (1983), Analysis of the defects responsible for the impaired regulation of Epstein-Barr virus-induced B cell proliferation by rheumatoid arthritis lymphocytes: Role of monocytes and the increased sensitivity of rheumatoid arthritis lymphocytes to prostaglandin E. J. Immunol. *131:* 768–772.

Hasler F. (1984), Vasculitis: Immunological aspects. Eur. Neurol. *23:* 389–393.

Hasler F. and Dayer J.M. (1988), Diminished IL-2-induced gamma interferon production by unstimulated peripheral blood lymphocytes in rheumatoid arthritis. Br. J. Rheumatol. *27:* 15–20.

Herzog C., Walker C., Pichler W. et al. (1987), Monoclonal anti-CD4 in arthritis (letter). Lancet; ii; 1461.

Jasin H.E. (1985), Autoantibody specificities of immune complexes sequestered in articular cartilage of patients with rheumatoid arthritis and osteoarthritis. Arthritis Rheum. *28:* 241.

Klareskog L., Forsum U., Wigren A., Wigzell H. (1982), Relationship between HLA-DR-expressing cells and T lymphocytes of different subsets in rheumatoid synovial tissue. Scand. J.-Immunol. *15:* 501–507.

Klareskog L., Johnell O., Hulth A., Holmdahl R. and Rubin K. (1986), Reactivity of monoclonal anti-type II collagen antibodies with cartilage and synovial tissue in rheumatoid arthritis and osteoarthritis. Arthritis Rheum. *29:* 1.

Konttinen Y.T., Reitamo S., Ranki A. et al. (1983), Characterization of the immunocompetent cells of rheumatoid synovium from tissue sections and eluates. Arthritis Rheum. *24,* 71–79.

Kurosaka M., Ziff M. (1983), Immunoelectron microscopic study of the distribution of T cell subsets in rheumatoid synovium. J. Exp. Med. *158:* 1191–1210.

Lopez-Bote J.P., Bernakeu P., Marquet A. et al. (1988), Adjuvant induced polyarthritis: Synovial cell activation prior to polyarthritis onset. Arthritis Rheum. *31:* 769–775.

Lotz M., Tsoukas C.D., Robinson C.A. et al. (1986), Basis for defective responses of rheumatoid arthritis synovial fluid lymphocytes to anti-CD3 (T3) antibody. J. Clin. Invest. *78:* 713–721.

Merryman P.F., Crapper R.M., Lee S., Gregersen P.K., Winchester R.J. (1989), Class II major histocompatibility complex gene sequences in rheumatoid arthritis. Arthritis Rheum. *32:* 251–258.

Moynier M., Cosso B., Brochier J. and Clot J. (1987), Identification of class II HLA alloantibo-

dies in placenta-eluted gamma globulins used for treating rheumatoid arthritis. Arthritis Rheum. *30:* 375.

Nathan C.F., Murray H.W., Wuke M.E. et al. (1983), Identification of gamma interferon as the lymphokine which activates human macrophage oxidative metabolism and antimicrobial activity. J. Exp. Med. *158:* 670–689.

Schumacher H.R., Kitridou R.C. (1972), Synovitis of recent onset. A clinicopathologic study during the first month of disease. Arthritis Rheum. *15:* 465–485.

Steere A.C., Duray H., Butcher E.C. (1988), Spirochetal antigens and lymphoid cell markers in Lyme synovitis: Comparison with rheumatoid synovium and tonsillar lymphoid tissue. Arthritis Rheum. *31:* 487–495.

Stuart J.M., Cremer M.A., Townes A.S. and Kang A.H. (1982), Type II collagen-induced arthritis in rats: Passive transfer with serum. J. Exp. Med. *155:* 1.

Tosato G., Steinberg A.D., Yarchoan R., Heilman C.A., Pike S.E., De. Seau V. and Blaese R.M. (1984), Abnormally elevated frequency of Epstein-Barr virus-infected B cells in the blood of patients with rheumatoid arthritis. J. Clin. Invest. *73:* 1789.

Trentham D.E., Dynesius R.A. and David J.R. (1978), Passive transfer by cells of type II collagen-induced arthritis in rats. J. Clin. Invest. *62:* 359.

Winchester R., Brancato L., Itescu S., Skovron M.L., Solomon G. (1988), Implications from the occurrence of Reiter's syndrome and related disorders in association with advanced HIV infection. Scand. J. Rheumatol. *74:* 89–93.

Young C.L., Adamson T.C., Vaughan J.H., Fox R.I. (1984), Immunohistologic characterization of synovial membrane lymphocytes in rheumatoid arthritis. Arthritis Rheum. *27:* 32–39.

Zvaifler N.J., Steinmann R., Kaplan G. et al. (1985), Dendritic cells in synovial effusions of patients with rheumatoid arthritis. J. Clin. Invest. *76:* 789–800.

Zvaifler N.J. (1985), Overview of Etiology and Pathogenesis. In: P.D. Utsinger, N.J. Zvaifler, G.E. Ehrlich: Rheumatoid arthritis, J.B. Lippincott Comp., Philadelphia, 151–160.

Dr. med. Friedrich Hasler, Chefarzt Rheumatologie, Klinik Valens und Medizinisches Zentrum Bad Ragaz, 7317 Valens.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich *135*/3: 139–154

Bewegung, Verformung und Gefüge des Gesteins[1]

Neil Mancktelow, ETH Zürich

Verformungsstrukturen sind in orogenen Zonen wie den Alpen, wo zwei kontinentale Landmassen kollidiert sind, in allen Massstäben zu beobachten. Sie zeigen die endliche Form, die durch Gesteinsbewegungen über Zeiträume von Jahrmillionen entstanden ist. Ihre Geometrie ist heute weitgehend durch detaillierte Feldaufnahmen bekannt. Die aktuelle Herausforderung ist die Rekonstruktion der Bewegungsgeschichte, d.h. der Kinematik, des Gesteins aus den vorhandenen Feldbeobachtungen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind verschiedene Arten von skalierten Modellen besonders nützlich, weil sie uns erlauben, die fortschreitende Entwicklung solcher Verformungsstrukturen zu verfolgen. Solche Modelle umfassen: kleinmassstäbliche Feldbeispiele für Regionalstrukturen; felsmechanische Experimente, in denen Zeit, Spannung und Temperatur gegeneinander skaliert sind; Modelle mit Analogmaterialien (z. B. Paraffinwachs); und schliesslich mathematische Modelle. Die Resultate dieser Modelle können dann im Feld angewendet werden: zum Beispiel in der Bestimmung der Bewegungen bei wichtigen Störungen wie der regionalen Abschiebung, die zwischen Simplonpass (Wallis) und Domodossola (Italien) aufgeschlossen ist.

Displacement, Deformation and Fabric of Rocks

Deformation structures can be observed on all scales within orogenic zones such as the Alps, where two continental land masses have collided. They represent the final form acquired due to relative movements of the rocks over millions of years, and their geometry is relatively well known from detailed field studies. The current challenge is to attempt a reconstruction of the movement history, i.e. the kinematics, from the available field data. To this end, various forms of scale models are particularly useful, as they allow study of the progressive development of deformation structures. The models may be smaller-scale field examples of major structures, rock mechanics experiments in which time, stress and temperature are scaled but the rock material is the same, models using analogue materials (e.g. paraffin wax), or mathematical models. The results of modelling can then be applied to field studies: as an example, in interpreting movements on major fault zones such as the low-angle extensional normal fault which is well-exposed between the Simplonpass (Valais) and Domodossola (Italy).

1 Einleitung

Die Erde ist tektonisch aktiv, und Gesteine werden über geologische Zeiträume bewegt und verformt. Die für Menschen spektakulärsten und gefährlichsten Anzeichen dieser Vorgänge sind grosse Erdbeben, wie z. B. vor kurzem in San Francisco. Solche Erdbeben können innerhalb von Sekunden Versetzungen von Metergrösse an der Erdoberfläche verursachen. Kumuliert über Mil-

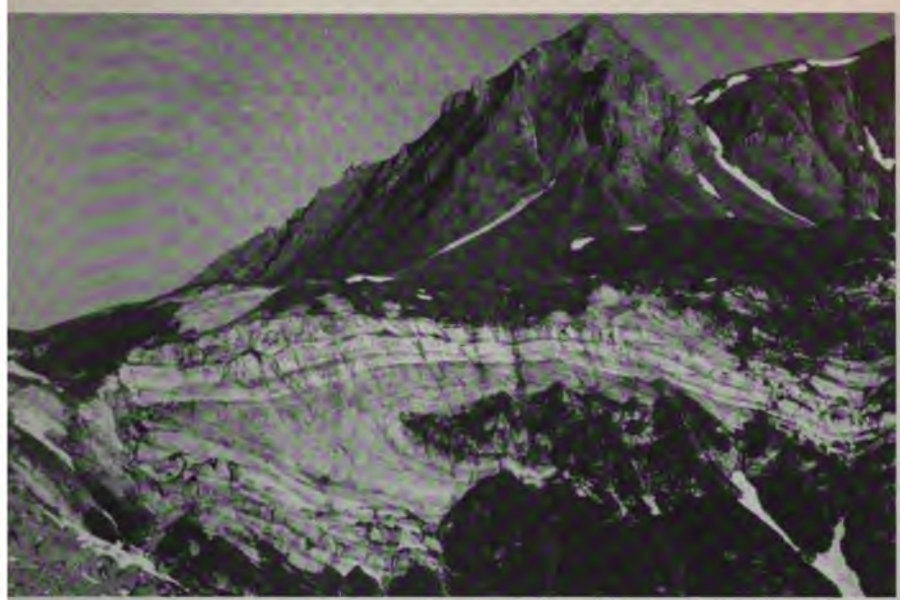
[1] Verdankung: Dieser Überblick über den Stand der Strukturgeologie aus meiner persönlichen Sicht wurde als Antrittsvorlesung an der ETH im November 1989 vorgetragen. Er stellt eine Zusammenfassung der Arbeit vieler meiner Vorgänger und jetzigen Kollegen dar, die die Grundlagen dieses Fachgebietes ausgearbeitet haben. Das Beispiel der Simplonstörung in den Zentralalpen entstammt überwiegend meiner eigenen Arbeit. Ich danke Niko Froitzheim für seine Hilfe bei der Korrektur des Deutschen.

lionen von Jahren, kann der totale Betrag der relativen Bewegung verschiedener Teile der Erdkruste Hunderte oder sogar Tausende von Kilometern erreichen, wie bei der San-Andreas-Störung, die für das Erdbeben von San Francisco verantwortlich war.

Die Verteilung rezenter Erdbeben auf der Erdkugel zeigt ein deutliches Netzwerk. Sechs grössere und einige kleinere «Platten», in denen praktisch keine Erdbeben stattfinden, werden umrahmt von engen Streifen, in denen seismische Aktivität und die damit verbundene Verformung der Erdkruste gehäuft auftreten (s. Skinner & Porter 1987, Fig. 16.27). Die Grenzen dieser Platten werden als konstruktive, destruktive oder konservative Grenzen klassifiziert: an konstruktiven Plattengrenzen entsteht neues Plattenmaterial durch den Ausfluss magmatischen Gesteins, was einer divergenten Bewegung der Platten entspricht, an destruktiven Plattengrenzen stossen zwei Platten zusammen, eine taucht unter die andere hinunter und wird dadurch konsumiert, und an konservativen Plattengrenzen gleiten zwei Platten aneinander vorbei. Die relative Bewegungsrate zwischen Platten kann an Hand des Musters der verschieden magnetisierten Streifen im neu gebildeten magmatischen Gestein an konstruktiven Plattengrenzen geschätzt werden. Neuerdings kann sie auch durch direkte Vermessung mit Hilfe von Satelliten bestimmt werden. Die relative Bewegungsrate erreicht bis zu 10 cm pro Jahr (s. Skinner & Porter 1987, Fig. 17.21).

Die kontinentalen Landmassen reiten auf diesen beweglichen Platten. In geologischen Zeiträumen von Jahrmillionen können sich kontinentale Landmassen an konvergenten Plattengrenzen annähern und schliesslich zusammenstossen, wie z. B. im Fall von Indien und Asien, deren Kollision die Entwicklung des Himalaya zur Folge hatte (s. Skinner & Porter 1987, Fig. 19.6). Ähnliche Bewegungen zwischen Afrika und Europa in den letzten 100 Ma haben ebenfalls zu einer kontinentalen Kollision geführt, durch die die Alpen entstanden sind (Dewey et al. 1989). Die starke Verformung der kontinentalen Gesteine in Folge dieser Kollision können wir heute in Form von geologischen Strukturen verschiedener Massstäbe erkennen: z. B. Falten, die einer Verkürzung der Gesteinsschichten entsprechen (Bild 1), oder sogenannte Boudins, die in anderen Partien eine Streckung des Gesteins zeigen (Bild 2). Durch diese Verformung entwickelt sich das komplexe Kartenmuster der Geologie der jetzigen Alpen.

In den Alpen liegt heute der verformte Endzustand des Gesteins nach den tektonischen Bewegungen vor. Die Frage ist, inwieweit man die Entwicklungsgeschichte aus der vorhandenen Geometrie rekonstruieren kann. Wir wollen aus der jetzigen statischen Geometrie die Bewegungen bestimmen, die ..se Geometrie verursacht haben, d. h. die Kinematik bestimmen. Wir wür... auch gern etwas über die Dynamik erfahren, also die Kräfte, die diese Be... ..ngen bewirkt haben. Dies sind unsere Ziele, aber zunächst müssen wir ..achten, wie Gesteine verformt werden und sich ihre Geometrie dadurch



Grossfalte in triadischen Dolomiten, Alpe Campolungo, Tessin

Major fold in Triassic dolomites, Alpe Campolungo, Tessin

Boudins in einer triadischen Dolomit-Schicht in Kalk-Matrix, beim Kaltwasserpass, lb des Simplonpasses, Wallis.

Boudinage of a Triassic dolomite layer within a calcite-marble matrix, Kaltwasserpass, the Simplon Pass, Wallis.

2 Geometrie, Kinematik, Dynamik

Die endliche oder finite Verformung kann man in eine Verschiebung, eine Verzerrung und eine Rotation aufteilen (Bild 3). Solange die Verformung eine finite Grösse hat, ist die Reihenfolge dieser Teilschritte wichtig. Wäre die Reihenfolge in Bild 3b, c, d geändert, käme man nicht zur gleichen endlichen Form. In Wirklichkeit jedoch ist die Verformung durch eine Serie von infinitesimal kleinen Verformungsschritten aufgebaut worden. Die künstliche Zerteilung in einzelne Komponenten (von Verschiebung, Verzerrung und Rotation) wird eine gute Annäherung an die gleichzeitige Aktivität dieser Komponenten sein, solange die einzelnen Schritte sehr klein sind. Bei solchen infinitesimalen Schritten ist die Reihenfolge der Komponenten unwichtig.

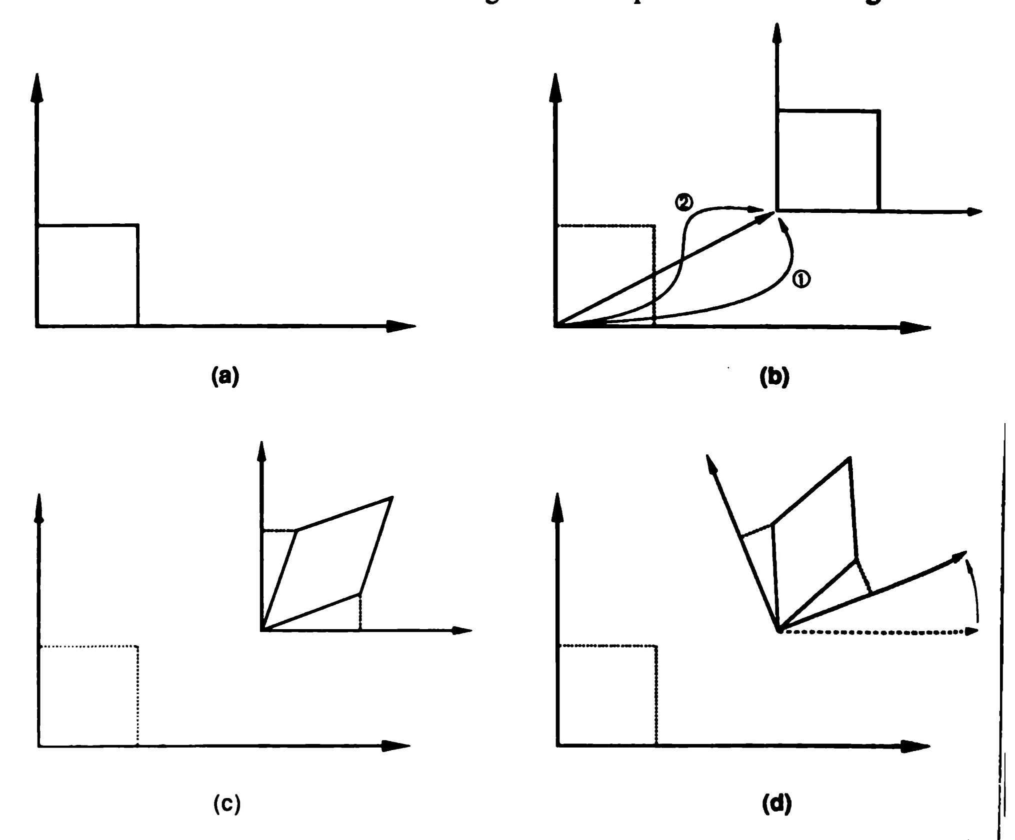


Bild 3 Verteilung der Verformung. (a) unverformter Zustand, (b) Verschiebung: mathematisch als ein Vektor dargestellt, der wahre Verschiebungsweg der einzelnen Punkte kann viel komplizierter sein, wie z. B. ① & ②, (c) Verzerrung, (d) Rotierung.

Fig. 3 Components of deformation. (a) initial, undeformed state, (b) translation: represented mathematically as a vector, though the true displacement path of individual points may be much more complex, e.g. paths ① & ②, (c) strain, (d) rotation.

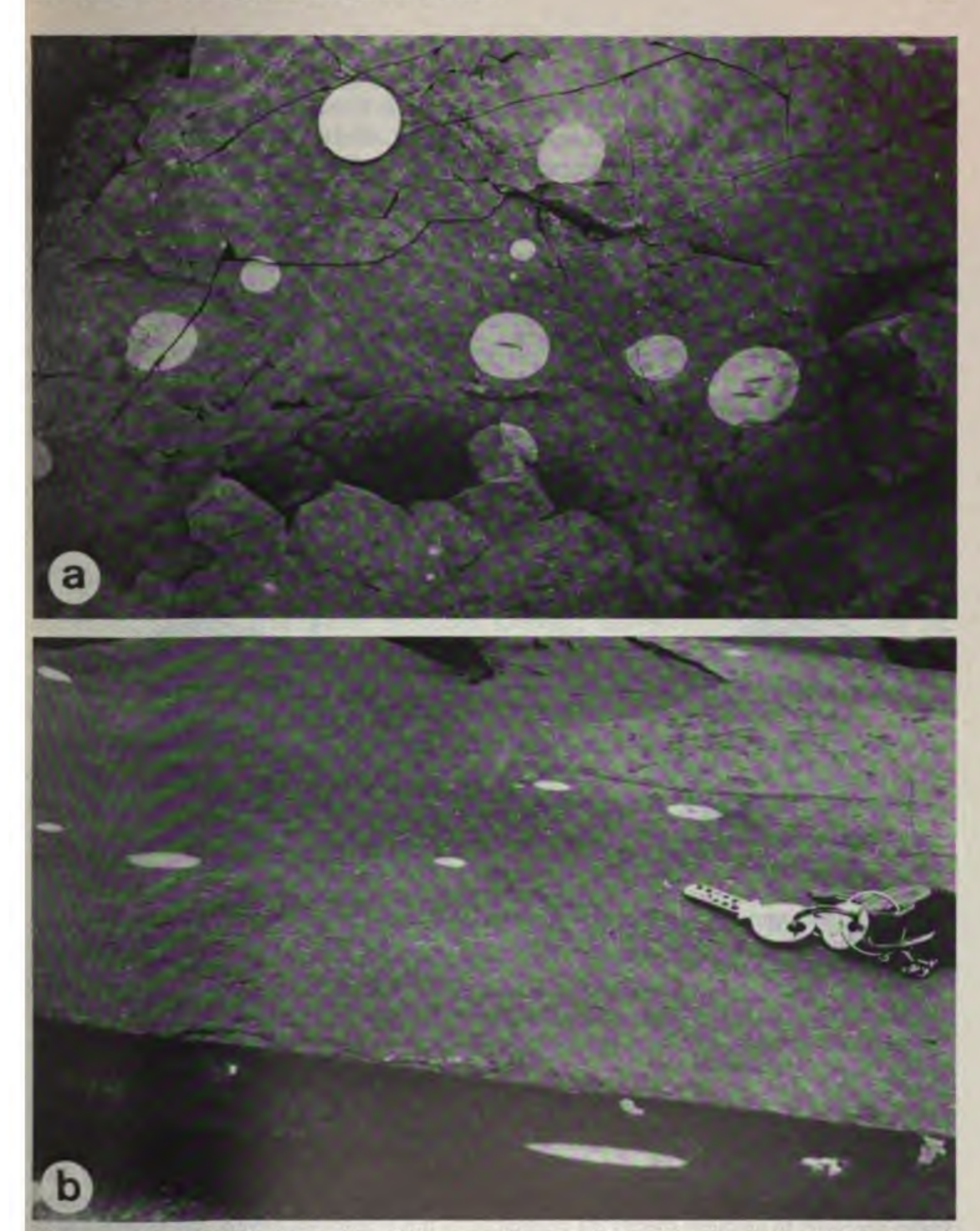


Bild 4 Grüne Reduktionsflecken, (a) in unverformtem Zustand in Sandstein-Schiefer-Gesteinen, Grand Canyon, USA, und (b) in verformtem Zustand in Schiefer von Nord-Wales, Grossbritannien.

Fig. 4 Green reduction spots: (a) in an undeformed state within a sandstone-shale lithology, Grand Canyon, USA, and (b) in a deformed state within slates from north Wales, Great Britain.

Der gleiche endliche Verformungszustand kann durch verschiedene mögliche Bewegungsbahnen erreicht werden (z. B. ① & ② in Bild 3b). Der endliche Verformungszustand allein lässt deshalb keinen eindeutigen Schluss auf die Verformungsbahn zu. Vom verformten Zustand allein haben wir ungenügend Daten, um die eigentliche, wahrscheinlich komplizierte Verschiebungsbahn eines Punktes zu bestimmen.

Wieviel von der Verformungsgeschichte können wir im Feldaufschluss wirklich bestimmen? Als einfachstes Beispiel betrachten wir den Fall, dass das Gestein ursprünglich sphärische Körper enthält, wie die sogenannten grünen Reduktionsflecken in roten Sedimenten (Bild 4a). Diese werden durch die Verformung in Ellipsoide umgeformt, die auf zweidimensionalen Flächen als Ellipsen erscheinen (Bild 4b). Wir können das Verhältnis der Achsen der Ellipse und ihre Orientierung auf drei verschiedenen Flächen messen, um ein dreidimensionales Ellipsoid zu konstruieren (Bild 5).

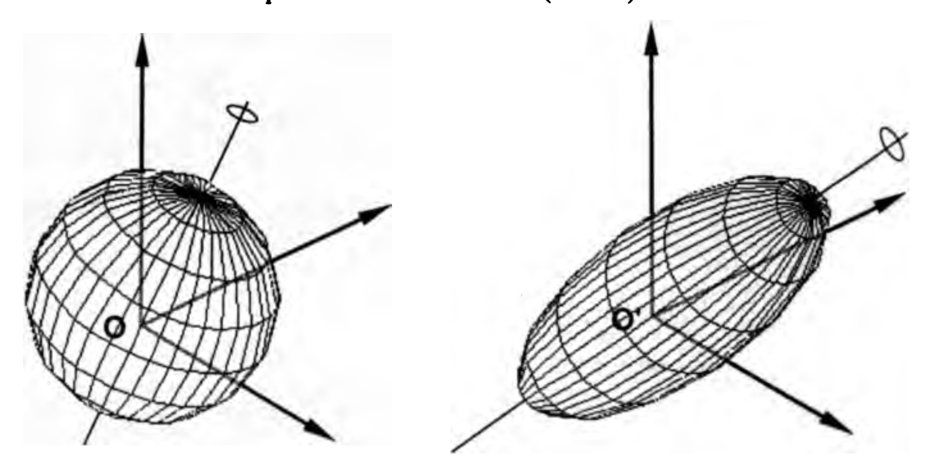


Bild 5 Unbekannte der Verformungsgeometrie, ausgehend von einer unverformten Kugel mit Einheitsradius. In dieser Figur gibt es insgesamt 12 Unbekannte (für drei Dimensionen) mit der folgenden physikalischen Bedeutung: 1, 2, 3: die Längen der drei Hauptachsen der verformten Ellipsoide; 4, 5, 6: die drei Winkel, die nötig sind, um die Orientierung der Hauptachsen des Ellipsoides relativ zu den drei Referenzachsen festzustellen; 7, 8, 9: die drei Winkel, die nötig sind, um die Orientierung dieser Linien vor der Verformung festzustellen; 10, 11, 12: die drei Komponenten des Verschiebungsvektors, der das Zentrum der Kugel mit dem Zentrum des Ellipsoides verbindet. Unbekannte 1, 2, 3 geben uns die Verzerrungskomponente der Verformung, 4, 5, 6, 7, 8, 9 die Rotationskomponente und 10, 11, 12 die Verschiebungskomponente.

Fig. 5 Deformation geometry as developed from an initial sphere of unit radius. In this figure, there are 12 unknowns (for three dimensions) related to the following physical parameters: 1, 2, 3: the lengths of the three principal axes of the deformed ellipsoid; 4, 5, 6: the three angles necessary to uniquely specify the orientation of this ellipsoid relative to the reference axes; 7, 8, 9: the three angles necessary to specify the orientation of lines parallel to these axes prior to deformation; 10, 11, 12: the three components of the translation vector relating the centre of the ellipsoid to the centre of the original sphere. Unknowns 1, 2, 3 describe the strain component of total deformation, 4, 5, 6, 7, 8, 9 the rotation component and 10, 11, 12 the translation compo-

Die Messungen ergeben zwei unabhängige Verhältnisse zwischen den drei Hauptachsen des Ellipsoids plus drei Winkel zwischen der langen Achse des Ellipsoids und geeigneten Referenzkoordinaten. In diesem Beispiel können wir, was meistens der Fall ist, den ursprünglichen Radius der unverformten Kugel nicht wissen und eine allfällige Volumenänderung nicht direkt bestimmen. Wir kennen die ursprüngliche Orientierung der Achsen der Verformungsellipsoide nicht und auch nicht die Verschiebung des Mittelpunktes der Ellipsoide, d.h. von den drei Komponenten der allgemeinen Verformung, Verschiebung, Verzerrung und Rotation, können wir nur die Verzerrung belegen.

Die endliche Verformung, soweit sie in Gesteinen gemessen werden kann, reicht nicht aus, um die Bewegungsgeschichte des Gesteins zurückzuverfolgen. Wir müssen zusätzliche Forschungsmethoden suchen. Die wichtigste dieser Methoden ist die Verwendung von verschiedenen Arten skalierter Modelle.

3 Modellierung von Verformungsstrukturen

3.1 Verformungsstrukturen im kleineren Massstab

Zunächst ist das detaillierte Studium kleiner, übersichtlicher Strukturen zu nennen, die als Modelle für geometrisch ähnliche, grossräumige Strukturen dienen. Solange die Schwerkraft nicht massgebend für die Verformungsstrukturen ist, sollte die entwickelte Geometrie massstabunabhängig sein.

Kleine Scherzonen (Bild 6) sind gute Beispiele für die Stärke dieser Methode: Ihre Geometrie kann direkt mit der Geometrie von kilometergrossen Störungszonen verglichen werden. Die Verformung in der abgebildeten Zone entspricht ungefähr dem als einfache Scherung bezeichneten Verformungsmodus (Bild 7). Mit zunehmender Scherung, in diesem Beispiel nach rechts, nimmt die Streckung der Verformungsellipse ständig zu. Die lange Achse der Ellipse entspricht der Hauptstreckungsrichtung des Materials, die im Gestein als Streckungslinear der Mineralkörner sichtbar ist. Der Winkel zwischen Streckungsrichtung und Scherrichtung nimmt mit zunehmender Verformung ab (Bild 7b). Bei sehr starker Scherung reduziert sich dieser Winkel fast bis auf null. Die Streckungsrichtung ist dann annähernd parallel zur Scherrichtung, d.h. zur lokalen tektonischen Bewegungsrichtung. Wir erwarten deshalb, dass bei sehr starker Scherung auch in grossen Störungszonen das Streckungslinear im Gestein sich der Bewegungsrichtung entlang der Störungszone annähert. Wie wir später in einem Beispiel aus dem Simplon-Gebiet sehen werden, ist diese Beobachtung von grosser Bedeutung für die Bestimmung der Kinematik in grossen Störungszonen.

Solche kleinen Beispiele mit einem klaren Verformungsgradienten eignen sich auch, um die Änderung des Mikrogefüges mit zunehmender Verformung zu studieren. Die Verformung der Körner durch Scherung auf intrakristallinen Gleitflächen führt im allgemeinen zu einer bevorzugten Orientierung der

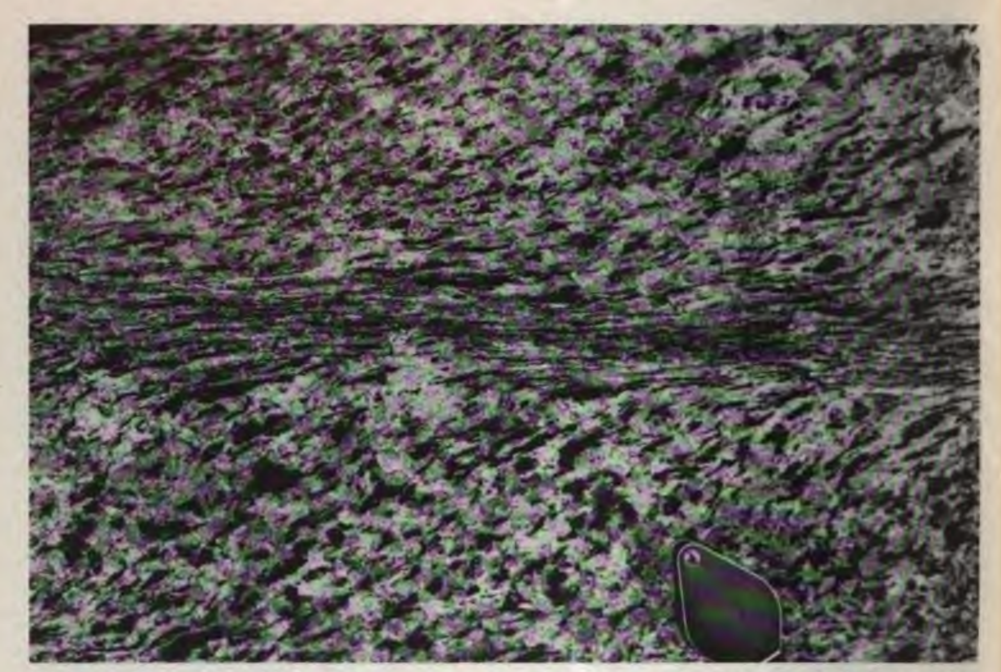


Bild 6 Kleinmassstäbliche Scherzone in granitischen Gneisen, Laghetti, oberhalb Fusio, Maggiatal, Tessin.

Fig. 6 Small-scale shear zone in granitic gneisses from Laghetti, above Fusio, Maggia Valley, Tessin.

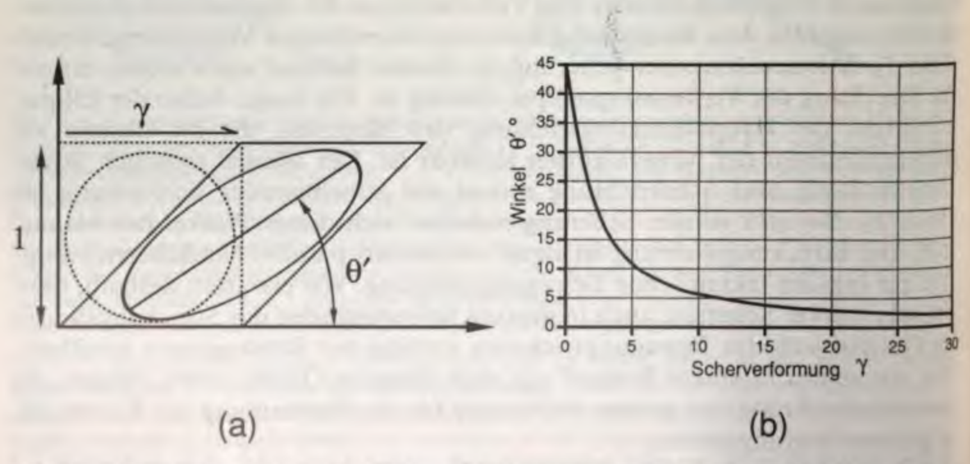


Bild 7 Geometrie der einfachen Scherung. Bild 7b gibt die Abnahme des Winkels zwischen der Achse der maximalen Streckung und der Scherrichtung wieder.

Fig. 7 The geometry of simple shear deformation. Fig. 7b is a graph of the change in angle between the major axis of the ellipse and the shear direction with increasing shear strain.

stallographischen Richtungen in den Mineralkörnern. Die Asymmetrie die- Gefüges steht, unter anderem, in einem Zusammenhang mit der Asymme- der Verformung. Wir können die Form der Gefügeasymmetrie bei kleinen ıerzonen, für die der Bewegungssinn eindeutig zu bestimmen ist, kontrol- en, um solche empirischen Resultate dann als Schersinnkriterium auf kilo- tergrosse Strukturen, wie z. B. wichtige Störungszonen in der Erdkruste, an- venden.

Gesteinsverformungsexperimente

formungsexperimente können direkt am Gesteinsmaterial durchgeführt :den. Solche Experimente stellen eine Art von skalierten Modellen dar, l Verformungen, die in der Natur Millionen von Jahren dauern, im Labor erhalb von Wochen oder maximal Monaten ablaufen müssen. Dies ent- icht einer Extrapolierung um ca. 7 Grössenordnungen in der Verformungs- ;, die man durch erhöhte Temperatur in den Experimenten zu kompensie- versucht. Die Extrapolierung ist nur möglich, solange die Verformungs- :hanismen über diesen grossen Bereich unverändert bleiben. Wir haben bleme, wenn die Verformung durch Prozesse beeinflusst wird, die ver- iedene Sensitivitäten für Verformungsrate und Temperatur haben. In die- ı Fall bleibt das Verhältnis zwischen diesen Prozessen nicht gleich, wenn ›erimente bei erhöhter Temperatur und Verformungsrate durchgeführt ·den.

Gesteinsexperimente sind praktisch die einzige Methode, das Fliessverhal- der Gesteine zu studieren. Wie in Bild 8 deutlich zu sehen ist, ändert sich Art der Gesteinsverformung mit zunehmendem Druck und/oder Tempe- ır (d.h. mit zunehmender Tiefe in der Erdkruste) von sprödem Zerbrechen, bei sich die Verformung auf Bruchflächen konzentriert, bis zu verteiltem ctilem Fliessen.

Gesteinsverformungsexperimente sind im allgemeinen jedoch ungeeignet das Studium komplexer Strukturen, wie z. B. Falten, weil:

die Proben klein gehalten werden müssen, um die nötige Fliessspannung zu erreichen (Bild 8). Dies lässt sehr wenig Spielraum für komplexe Geometrien.

oft starke Randeffekte auftreten.

die Entwicklung der Strukturen nicht kontinuierlich beobachtet werden kann, da die Probe im Inneren der Verformungsmaschine unsichtbar ist. Nur der Anfangs- und der Endzustand des Experiments sind dem Experimentator zugänglich.

die Verformungsverteilung durch die Probe kaum zu bestimmen ist. Wir können nur die Verformung messen, die am Rand der Probe verursacht wurde. Die Veränderung der Verformung von Stelle zu Stelle innerhalb der Probe ist unbekannt.

Solnhofenkalk

Temperatur = 25°C
Verformungsrate = 4 x 10^{-5}

zunehmender Umgebungsdruck

Bild 8 Experimentelle Gesteinsverformung von Solnhofenkalk mit zunehmendem Umgebungsdruck. Die Experimente wurden von Dr. U. Briegel an der ETH-Zürich durchgeführt.

Fig. 8 Experimental rock deformation of Solnhofenkalk, showing the effect of increasing confining pressure on the style of rock deformation. The series of experiments were conducted by Dr. U. Briegel at the ETH-Zürich.

Für das Studium der Entwicklung komplexer Strukturen bieten sich skalierte Analog-Modelle an.

3.3 Analog-Modelle

Für Analog-Modelle muss das gewählte Material eine rheologische Ähnlichkeit zu Gesteinen aufweisen. Kurven für Spannung gegen Verformung, Verformungsrate oder Temperatur müssen ähnlich aussehen; nur die Spannungsachse darf skaliert werden. Weil wir Analog-Materialien wie Paraffinwachs auswählen, deren Fliessspannungen um Grössenordnungen niedriger als bei Gesteinen sind, können wir Blöcke mit Dimensionen bis zum halben Meter im Labor verformen. Die Verformungsgeschichte von eher komplizierten Geometrien können wir dann mit Photos aufnehmen.

Das angebrachte Gitter kann man digitalisieren und zu jedem Zeitpunkt erformung an jeder Stelle auf der Oberfläche des Modells bestimmen. Verformung kann in Komponenten von Verzerrung, Rotation und Verung aufgeteilt werden, um die Resultate dann direkt mit natürlichen

ielen zu vergleichen (Bild 9). Solche Analog-Modelle sind nicht nur ich bei der Erforschung der Geometrie von meter- oder kilometergrossen turen. Sie sind auch unerlässlich, um die Verformung im Kornbereich dort insbesondere die Entwicklung von bevorzugter Orientierung zu stu- n (z. B. Urai et al. 1986). Da die Verformungsgeschichte bekannt ist, kann versuchen, die Form des entwickelten Mikrogefüges mit dieser zu korre- . Durch eine solche empirische Kalibrierung hofft man gemessene Gefü- t der Natur vergleichen zu können, um die Verformungsgeschichte abzu- zen.

Bild 9a Analog-Modell-Experimente zur Faltenentwicklung. Die Experimente wurden von M. R. Abbassi an der ETH-Zürich durchgeführt. Modellmaterialien sind Paraffinwachse mit verschiedenen Schmelztemperaturen. Die steifere Schicht benötigt eine Fliessspannung ca. 35mal grösser als die umhüllende Matrix.

Fig. 9a Analogue model experiments of single-layer fold development. The experiment was conducted by M. R. Abbassi at the ETH-Zürich. The analogue materials are paraffin waxes with differing melting points; the stiffer layer has a yield stress approx. 35 times that of the surrounding matrix.

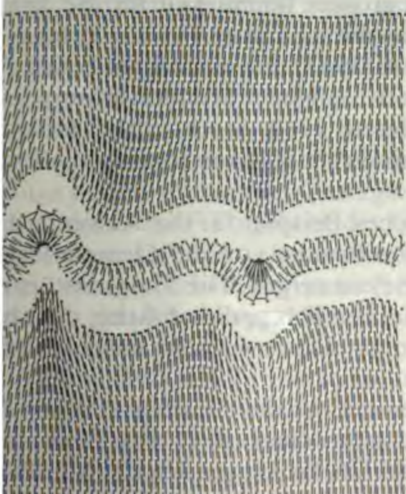


Bild 9b Eine Darstellung der längeren Achsen der Verformungsellipse, verteilt auf der Oberfläche des Modells. Die Trajektorien parallel zu diesen Achsen entsprechen der Schieferung, die in natürlichen Gesteinen entwickelt wird.

Fig. 9b Plot of the long axes of the deformation ellipse across the surface of the model. Trajectories parallel to these axes can be compared to the cleavage which develops in natural rocks.

3.4 Theoretische Modelle

Theoretische, d.h. mathematische Modelle können ebenfalls viel zur Erläuterung der Entwicklung geologischer Strukturen beitragen. Die meisten geologischen Prozesse sind jedoch sehr komplex: Sie finden in Materialien (d.h. Gesteinen) statt, die keine einfache lineare Beziehung zwischen Spannung und Verformung oder Verformungsrate aufweisen, sie werden oft durch Diskontinuitäten oder Unregelmässigkeiten ausgelöst und sind oft stark von der Inhomogenität des Gesteins im Kornbereich beeinflusst. Um analytische oder numerische Resultate innerhalb der durch die Kosten eines Grossrechners gegebenen Grenzen zu erhalten, war es bisher nötig, das System durch Annahmen stark zu vereinfachen. Da heute die Rechengeschwindigkeit von Computern aller Grössen zugenommen und das Preis-Leistungs-Verhältnis sich stark verbessert hat, wird die Komplexität numerisch modellierbarer Systeme entsprechend grösser und diese Art der geologischen Modellierung immer wichtiger.

4 Anwendung an einem Feldbeispiel: Die Simplonstörung

In diesem Abschnitt soll die Anwendung einiger dieser grundsätzlichen Resultate anhand eines Beispiels aus den Alpen kurz aufgezeiget werden. Die Verformung des Gesteins ist im allgemeinen instabil und konzentriert sich oft auf enge Zonen; dies sieht man am häufigen Auftreten von Scherzonen und Brüchen in jedem Massstab (wie z.B. Bild 6). Diese Störungen können von grosser tektonischer Bedeutung sein, da die relativen Bewegungen an ihnen oft in der Grössenordnung von Zehnern oder Hunderten von Kilometern sind und die Bewegungen in den danebenliegenden Gesteinsarealen bei weitem übertreffen. Zwei solche Störungen von grosser Wichtigkeit für die Tektonik der Zentralalpen sind die sogenannte Insubrische oder Periadriatische Linie im Süden (z.B. Ahrendt 1980, Schmid et al. 1987), die die Penninischen Alpen von den Südalpen trennt, und die Simplon-Linie oder Simplonstörung im Westen (z.B. Amstutz 1954, Hunziker & Bearth 1969, Steck 1984, Mancktelow 1985), die die Oberen und Unteren Penninischen Decken trennt (Milnes et al. 1981).

Die Simplonstörung kann als praktisches Beispiel für die Anwendung unserer neueren Kenntnisse dienen, um den Sprung von der Geometrie in die Kinematik (d.h. die Bewegungsgeschichte) zu zeigen. Die Simplonstörung ist topographisch deutlich zu sehen, als eine ziemlich gerade Fläche, die auf der Karte als Linie (Simplon-Linie) erscheint, welche zwei sehr unterschiedliche Domänen begrenzt (Bild 10).

Über der Simplonstörung, im Hangenden, ist das Gestein in einer Zone, die einige hundert Meter umfasst, stark zerbrochen (Bild 11a). Dies steht in krassem Kontrast zu den Gesteinen unterhalb, im Liegenden der Störungsfläche. Hier findet man ein kilometerbreites Band mit einer sehr intensiven ebe-

d 10 Blick von NW auf die Simplon-Störungszone im Zwischbergental oberhalb Gondo, allis.

g. 10 View towards the Simplon Fault Zone from the northwest in Zwischbergental, above ondo, Wallis.

en Schieferung ungefähr parallel zur Trennfläche (Bild 11b). Die Lineation dieser Schieferung, durch stark gestreckte Mineralien definiert, fällt nach üdwesten ein. Wir wissen von unseren Beobachtungen aus kleineren Scheronen und von theoretischen und Analog-Modellen, dass bei starker Scheung diese Lineation die relative Bewegungsrichtung der Scherzone annäernd wiedergibt.

Der Bewegungssinn ist damit aber noch nicht bestimmt. Wenn wir die Mirogefüge in den verformten Quarzgängen untersuchen, finden wir eine starke ristallographische Einregelung der Quarzkörner. Diese kann entweder unter em optischen Mikroskop oder mit dem Röntgentexturgoniometer gemessen erden, und man erhält, der ganzen Störungszone entlang, ein gleichbleibenes Muster von kristallographischer Vorzugsorientierung. Die c-Achsen z. B. efinieren einen Gürtel, der asymmetrisch gegenüber der Schieferung ist Mancktelow 1985, 1987). Die Resultate können wiederum verglichen werden mit Beobachtungen aus kleineren Scherzonen in quarzreichen Gesteinen uner vergleichbaren Temperaturbedingungen, d. h. für die Simplonstörung etwa 00–400° C. Diese kleinen Scherzonen zeigen ein ähnliches asymmetrisches efüge und lassen uns klar bestimmen, dass die Bewegung an der Simplon-

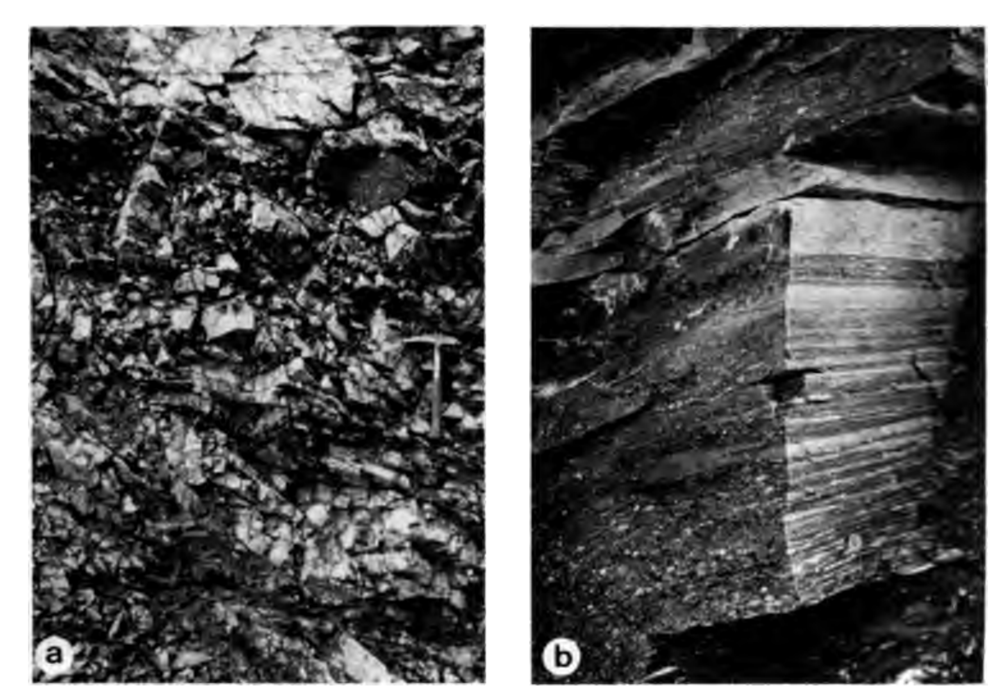


Bild 11 Vergleich der Verformungsgefüge im Hangenden (11a) und Liegenden (11b) der Simplonstörung. Im Hangenden ist das Gestein spröd zerbrochen (zur Zeit der Simplonstörung), im Liegenden wurden eine starke Schieferung und ein Mineralstreckungslinear durch duktiles Fliessen gebildet.

Fig. 11 Comparison between the deformation fabric in the hangingwall (11a) and the footwall (11b) of the Simplon Fault Zone. In the hangingwall, the rocks are brittle faulted during movement on the Simplon Fault Zone, whereas in the footwall they have developed a strong planar schistosity and stretching lineation as the result of ductile deformation.

störung einer Abschiebung entspricht: das Hangende ist relativ zum Liegenden nach Südwesten und gleichzeitig nach unten bewegt worden. Diese Bewegung wird dokumentiert durch den Sprung in den Abkühlungsaltern der Mineralien über die Simplonstörung hinweg, der mit Isotopenuntersuchungen festgestellt wurde (z. B. Hunziker & Bearth 1969, Purdy & Jäger 1976). Die Gesteine des Liegenden gelangten erst zur Zeit der Aktivität der Simplonstörung nahe an die Erdoberfläche, während die Gesteine des Hangenden schon früher in einer oberflächennahen Position waren. Dadurch ist der Zeitpunkt, an dem die Gesteine unter eine bestimmte Temperatur, nämlich die «Schliessungstemperatur» des jeweils untersuchten Isotopen-Systems, abgekühlt wurden, für das Liegende später als für das Hangende: Die Abkühlungsalter der Minerale sind im Liegenden wesentlich jünger als im Hangenden.

Die Bewegungsgeschichte und die dadurch entstandenen Gefüge des Gesteins sind eng gekoppelt. Die Gesteine im oberen Teil der Erdkruste verhiel-

ten sich spröd, d.h. sie brachen, während im tieferen Niveau bei höherer Temperatur und höherem Druck duktiles Fliessen vorherrschte (s. Bild 8). Dieser Übergang findet in quarzreichen Gesteinen wie denen des Simplon-Gebiets bei ca. 300° C statt, also unter normalen Bedingungen in etwa 10 km Tiefe. Die Geometrie ist jedoch nicht statisch, die Gesteine sind in Bewegung. Dadurch wurden die ursprünglich duktilen Gesteine im Liegenden der Simplonstörung relativ zu den kühleren, spröddeformierten Gesteinen im Hangenden aufwärts transportiert, sie wurden abgekühlt und konnten schliesslich nicht mehr duktil fliessen. Nun wurden sie als ein «fossiles» Gefüge passiv entlang dem Bruch weitertransportiert. Daraus folgen die unterschiedlichen Gefüge im Liegenden und Hangenden (Bild 11a und 11b) und ebenso auch der Sprung in den Mineralaltern. Die jetzige Geometrie bildet so die gesamte Bewegungsgeschichte der Gesteine ab.

5 Zusammenfassung

Wir sind heute in einer neuen Phase des Studiums der verformten Gesteine. Die Geometrie ist durch langjährige Beobachtungen und durch Feldkartierung relativ gut bestimmt. Aufgrund der neueren Erkenntnisse über das Verformungsverhalten der Gesteine, die durch verschiedene Methoden (Analog-Modelle, experimentelle Gesteinsdeformation und theoretische Modelle) gewonnen wurden, können wir heute aus der Geometrie wesentlich mehr über die Kinematik der tektonischen Prozesse ableiten. Wir sind in einer sehr spannenden Periode der Alpenforschung, denn durch die Neubearbeitung der Geometrie ist klargeworden, dass die Geschichte der Bewegungen in den Alpen komplizierter und auch interessanter ist als die früher angenommenen, immer nach NW gerichteten Überschiebungen. Insbesondere gibt es klare Beweise (z.B. an der Simplonstörung) für anhaltende Verschiebungen parallel zum Alpenbogen in den letzten 20 Millionen Jahren.

Die ganze Kinematik der Alpen während ihrer Entwicklung in den letzten 100 Millionen Jahren ist keinesfalls vollständig abgeklärt und lässt noch viele kritische Fragen auch für die kommenden Geologengenerationen offen.

6 Literatur

Ahrendt, H. (1980): Die Bedeutung der Insubrischen Linie für den tektonischen Bau der Alpen. N. Jb. Geol. Paläont. (Abh.) *160:* 336–362.

Amstutz, A. (1954): Pennides dans l'Ossola et problème des racines. Arch. Sci. Genève *7:* 411.

Dewey, J.F., Helman, M.L., Turco, E., Hutton D.H.W. & Knott, S.D. (1989): Kinematics of the western Mediterranean. In: Alpine Tectonics (Coward, M.P., Dietrich, D. & Park, R.G. eds.), 265–283. Geological Society Special Publication *45.*

Hunziker, J.C. & Bearth, P. (1969): Rb-Sr-Altersbestimmungen aus den Walliser Alpen. Biotit-

alterswerte und ihre Bedeutung für die Abkühlungsgeschichte der alpinen Metamorphose. Eclogae geol. Helv. *62:* 205–222.
Mancktelow, N.S. (1985): The Simplon Line: a major displacement zone in the western Lepontine Alps. Eclogae geol. Helv. *78:* 73–96.
Mancktelow, N.S. (1987): Quartz textures from the Simplon Fault Zone, southwest Switzerland and north Italy. Tectonophysics *135:* 133–153.
Milnes, A.G., Greller, M. & Müller, R. (1981): Sequence and style of major post-nappe structures, Simplon–Pennine Alps. J. Struct. Geol. *3:* 411–420.
Purdy, J.W. & Jäger, E. (1976): K-Ar ages on rock-forming minerals from the Central Alps. Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova *30.*
Schmid, S.M., Zingg, A. & Handy, M. (1987): The kinematics of movements along the Insubric line and the emplacement of the Ivrea Zone. Tectonophysics *135:* 47–66.
Skinner, B.J. & Porter, S.C. (1987): Physical Geology. John Wiley & Sons, New York.
Steck, A. (1984): Structures de déformation tertiaires dans les Alpes centrales. Eclogae geol. Helv. *77:* 55–100.
Urai, J.L., Means, W.D., Lister, G.S. (1986): Dynamic recrystallization of minerals. In: Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies. The Paterson Volume (Hobbs, B.E. & Heard, H.C. eds.), 161–199. Geophysical Monograph *36,* Amer. Geophys. Union, Washington.

PD Dr. Neil Mancktelow, Geologisches Institut ETHZ, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/3*: 155–168

Das Kind mit Diabetes mellitus: Zwischen Immunologie und Psychologie[1]

Eugen J. Schönle, Universitäts-Kinderklinik Zürich

Der Diabetes mellitus (Zuckerkrankheit) beim Kind (Typ-1-Diabetes mellitus) ist eine Hormonmangelkrankheit, es fehlt das lebenswichtige Hormon Insulin. Allgemein ist heute akzeptiert, dass der Typ-1-Diabetes die Folge einer Autoimmun-Störung ist. Diese entwickelt sich auf dem Hintergrund einer genetischen Prädisposition. Jüngste Ergebnisse aus der molekulargenetischen Forschung deuten auf eine prädisponierende Stelle innerhalb des Gens für das HLA-DQ-Beta-Protein. Auslösende spezifische Faktoren, die der selektiven autoimmunen Zerstörung der insulinproduzierenden Betazellen vorausgehen, sind bis heute unbekannt. Am Ende des autoimmunen Prozesses sind alle Betazellen des Pankreas zerstört, eine Regeneration ist nicht möglich, die lebenslange Insulin-Ersatztherapie unumgänglich. Genaue Therapie verzögert das Auftreten der Spätschäden bei Diabetikern. Deshalb werden bereits an die Behandlung des Diabetes mellitus bei Kindern hohe Anforderungen gestellt. Eine Optimierung der Therapie bedingt vor allem eine ausführliche Schulung des Patienten und seiner Eltern, die Anwendung der modernen Urin- und Blutzucker-Kontrollmöglichkeiten, einen exakten Ernährungsplan und multiple tägliche Insulin-Injektionen. Der heutige Stand der Forschung erlaubt noch keine Prävention, insbesondere keine Unterbrechung des autoimmunen Zerstörungsprozesses.

The Child with Diabetes Mellitus: Between Immunology and Psychology

Childhood diabetes (Type-1-diabetes) is based on the lack of the essential hormone insulin. It is now widely accepted, that the development of Type-1-diabetes is the consequence of an autoimmune destruction of the insulin-producing beta cells of the pankreas. However, a genetic predisposition is required. In addition recent results from moleculargenetic research suggest a susceptibility gene in the HLA-region on chromosome 6. Trigger substances inducing the initial beta cell destruction are not known today. Finally all insulin producing cells are destroyed, life long insulin replacement therapy cannot be circumvented. Optimal treatment delays or prevents diabetic late complications. Precondition for optimal therapy is an extensive education of the child an the parents, an exact diet with known amounts of carbohydrates, multiple insulin injections and home blood glucose monitoring. Prevention of the autoimmune destruction is not yet possible up to now.

1 Einleitung

Der Diabetes mellitus – die Zuckerkrankheit – ist die häufigste der schweren chronischen Krankheiten im Kindesalter. Diese Feststellung mag deshalb erstaunen, da die breite Öffentlichkeit mangels eigentlicher Kenntnisse davon kaum berührt wird. Kinder mit Diabetes mellitus fallen nämlich in keiner Weise auf, man sieht ihnen die Krankheit nicht an. Trotzdem ist der Diabetes mellitus beim Kind in verschiedenster Hinsicht als einzigartig und schwerwiegend einzustufen.

[1] Nach der Antrittsvorlesung der Medizinischen Fakultät der Universität Zürich, 2.12.1989

Die Zuckerkrankheit bei älteren und übergewichtigen Leuten ist wohlbekannt als sogenannter Alterdiabetes. Hierbei handelt es sich um eine uralte Zivilisationskrankheit, die in allen kulturell hochstehenden Völkern, in denen auch Übergewichtigkeit seit eh und je möglich war, zu verzeichnen ist. In der Fachsprache wird der Alterdiabetes als Typ-2-Diabetes bezeichnet; er unterscheidet sich vor allem in pathogenetischer Hinsicht vom Diabetes mellitus bei Kindern.

Nur etwa 1% aller Diabetiker in der Schweiz sind Kinder und Jugendliche unter 18 Jahren.

Im Unterschied zum Altersdiabetes ist die Störung beim Kind gekennzeichnet durch einen Mangel an Insulin, es handelt sich hier also um eine eigentliche Hormonmangelkrankheit, die als Typ-1-Diabetes bezeichnet wird. Im Altertum war diese Form des Diabetes wahrscheinlich unbekannt, denn erst in der Mitte des letzten Jahrhunderts ist erkannt worden, dass auch bei Kindern ein Diabetes auftreten kann, und man hat realisiert, dass Kinder im Gegensatz zu Erwachsenen relativ rasch an dieser Krankheit sterben.

2 Geschichtlicher Hintergrund

Die Entdeckung des Insulins durch Banting und Best im Jahre 1922 in Kanada war eine epochemachende Leistung der medizinischen Forschung (M. Bliss 1982). Die damaligen Ereignisse überstürzten sich geradezu, denn bereits wenige Monate nach der erstmaligen Isolierung des Hormons war es möglich, Insulin in mehreren Ländern kommerziell herzustellen und der klinischen Anwendung zugänglich zu machen. Dadurch wurde ein dramatischer Umbruch in der Therapie des Diabetes mellitus ausgelöst, indem man plötzlich über ein Therapeutikum für eine bis dahin unbehandelbare Krankheit verfügte, was hauptsächlich den jungen und jüngsten, meist todkranken Patienten zugute kam. Grossenteils durch diese Entdeckung veranlasst, setzte dann eine gewaltige, umfangreiche und allseitige Arbeit über Diabetes und über Kohlehydratstoffwechsel ein und ergab viele wichtige Erkenntnisse.

Heute, mehr als 60 Jahre später, darf man festhalten, dass diese damals lancierte, gewaltige Forschungsarbeit in der Diabetologie zielgerichtet und unvermindert weitergeführt wird. Allerdings haben sich in der Therapie des Diabetes beim Kind keine ähnlich umwälzenden Neuerungen mehr eingestellt, obwohl dies für eine optimale Insulin-Therapie durchaus vonnöten wäre; die Kontrolle der Insulin-Behandlung ist heute zwar viel besser, die Insuline sind rein, das Insulinspritzen weniger unangenehm als früher, und doch muss das Insulin immer noch subkutan gespritzt werden. Ein Kind mit Diabetes ist zeitlebens mehrmals täglich auf Insulininjektionen angewiesen, und es bleibt bei langjährigem Verlauf wegen ungenügender Perfektion der Therapie weiterhin den Gefahren diabetischer Spätschäden, die vor allem die Augen und die Nieren betreffen, ausgesetzt.

Vor der Entdeckung des Insulins bestand für das erkrankte Kind keine berlebenschance. Ohne Insulin können Nährstoffe vom Organismus nicht rwertet werden, die Glucose als wichtigster Energielieferant kann in den örperzellen nicht mehr verbrannt werden. Als Folge davon kommt der Orgasmus in einen schwerwiegenden katabolen Zustand. Dies änderte schlagtig, nachdem Insulin zur Verfügung stand, innert weniger Wochen sahen krankte Kinder wieder völlig gesund aus.

Heute sind dies vergangene Zeiten, der Diabetes beim Kind wird im allmeinen früh diagnostiziert, und es wird sofort mit der Insulin-Behandlung gonnen. Und doch sind es nicht ganz vergangene Zeiten, denn es ereignen :h noch Situationen wie aus der Vor-Insulin-Ära. Der Typ-1-Diabetes ellitus im Kindesalter wird auch heute noch unterschätzt.

Ein Beispiel erlebten wir im Kinderspital im letzten Frühjahr, als ein 14jähges afrikanisches Mädchen aus Somalia stark abgemagert, in desolatem, prämatösem Zustand zu uns kam. Man hatte bei ihm in Somalia ein halbes hr zuvor den Diabetes diagnostiziert und den Eltern erklärt, man müsse die- Krankheit mit Insulin behandeln. Insulin war aber in diesem afrikanischen ınd nicht erhältlich. Was für ein Kontrast! 1989 ist Insulin weltweit im berfluss vorhanden, es wird von den meisten Firmen heute biosynthetisch rgestellt, es ist billig, wir Europäer streiten uns, ob der Unterschied in bezug ıf eine Aminosäure zwischen dem Schweine-Insulin und dem menschlichen sulin eine Rolle spielt, und in Dritt-Welt-Ländern gibt es keine Möglichkeit, sulin für die Behandlung der dort diagnostizierten diabetischen Kinder zu halten.

Die Neuzeit der Diabetologie begann 1889, also vor genau 100 Jahren. Daals wurde von Oskar Minkowski, einem deutschen Internisten, in einer chtigen Publikation beschrieben, dass die Entfernung der Bauchspeicheldüse bei einem Versuchstier zu einem Diabetes mellitus führt. Bis zu diesem ;itpunkt galt das Pankreas als unwichtiges Organ, und der Diabetes wurde ; Störung der Nieren angesehen. In diesem Zusammenhang ist es erwähnswert, dass der Schaffhauser Arzt Johann Conrad Brunner schon vor was mehr als 300 Jahren in derselben Richtung experimentierte, die entheidende Entdeckung aber verpasste. Er stellte bei Hunden nach Pankreasstirpationsversuchen die typischen diabetischen Symptome Polyurie und ılydipsie fest. Da die vorgenommene Pankreatektomie aber jeweils unvollindig war, erholten sich die Hunde bald, woraus Brunner erst recht den hluss zog, dass die Bauchspeicheldrüse ein nicht lebensnotwendiges Organ i.

Einige Jahre nach Minkowskis Entdeckung zeigte es sich, dass der Diabe- ; beim Fehlen einer Substanz aus den Langerhansschen Inseln des Pankreas ftritt, und 1922 wurde schliesslich das Hormon Insulin als die entscheiden- Substanz entdeckt, deren Fehlen zum Diabetes mellitus führt.

Heute hat man eine recht genaue Vorstellung, wie es zu diesem Hormonangel kommt.

3 Pathogenese des Typ-1-Diabetes

Der Typ-1-Diabetes ist die Folge einer Autoimmunkrankheit. Durch die autoimmune Störung gehen die insulinproduzierenden Zellen in der Bauchspeicheldrüse selektiv unter. Wenn sämtliche insulinproduzierenden Betazellen verschwunden sind, tritt ein absoluter Insulin-Mangel ein. Deshalb findet man im Pankreas eines diabetischen Patienten keine Betazellen mehr. Eine Regeneration ist nicht möglich.

Bild 1 zeigt schematisch den chronologischen Ablauf der Zerstörung der Beta-Zellen und somit die Pathogenese des Typ-1-Diabetes mellitus (modifiziert nach G.S. Eisenbarth, 1987). Der Untergang der insulinproduzierenden Beta-Zellen kann grob in vier Phasen unterteilt werden: genetische Prädisposition, auslösender Faktor oder Trigger, autoimmune Störung und schliesslich manifester Diabetes mellitus.

Für die genetische Prädisposition gibt es verschiedene Anhaltspunkte: Ausführliche Studien aus England (A.H. Barnett, 1981) bei eineiigen Zwillingspaaren zeigen, dass nach Erkrankung des einen Zwillings an Typ-1-Diabetes mellitus das Risiko für den anderen Zwilling, in den folgenden 5 Jahren ebenfalls an Typ-1-Diabetes mellitus zu erkranken, ungefähr 50% beträgt. Dieser Prozentsatz ist bei einem eineiigen Zwilling einerseits zu niedrig für eine rein genetisch übertragene Störung und anderseits zu hoch für eine Störung ohne genetischen Hintergrund.

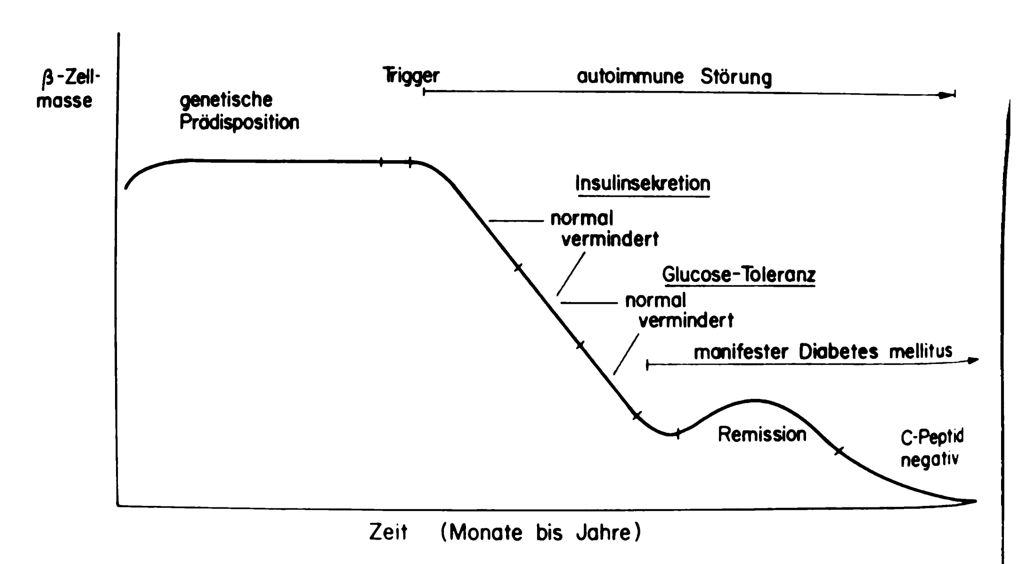


Bild 1 Pathogenese des Typ-1-Diabetes mellitus als Funktion der Betazellmasse

Fig. 1 Pathogenesis of Type-1-diabetes mellitus as a function of the beta cell mass

er der genetischen Grundlage konnte seit Anfang der siebziger
, 1981) erarbeitet werden. Es zeigte sich, dass eine Assoziation
betes mellitus mit bestimmten HLA-Typen (HLA = Human
ntigen) besteht. Die HLA-Gruppen sind eine Art genetisch
lutgruppen der weissen Blutzellen. Sie sind essentiell bei der
Auslösung immunologischer Vorgänge. Es gilt heute als ge-
r Typ-1-Diabetes gehäuft mit HLA DR 3 und/oder DR 4
ner dieser beiden HLA-Typen oder beide sind in über 95% der
er zu finden, im Gegensatz zu 40–45% bei der gesunden Bevöl-
stlichen Hemisphäre.
schematisch das Chromosom 6 und einen Ausschnitt aus des-
rm. An dieser Stelle des Chromosoms sind die HLA-Gruppen
usgedehnten Familienstudien gelang es, einen sogenannten Sus-
ocus für Typ-1-Diabetes zu postulieren, der sich innerhalb oder
rer Nachbarschaft der HLA-Class-II-Gene, also in der HLA-D-
nden musste. In der Zwischenzeit konnte der genetische Code di-
-Class-II-Gene entziffert werden. Dabei stellte man etwas Speziel-
p-1-Diabetes fest: An Position 57 der DQ-Beta-Untereinheit findet
Typ-1-Diabetes nie den Code für eine Asparaginsäure, umgekehrt
ner Code dort beim Gesunden praktisch immer vorhanden (J. A.
). Als Interpretation bietet sich an, dass eine Asparaginsäure an
der DQ-Beta-Untereinheit einen möglichen Resistenzfaktor für
etes darstellt; oder umgekehrt, das Nichtvorhandensein wäre ein
tätsfaktor.

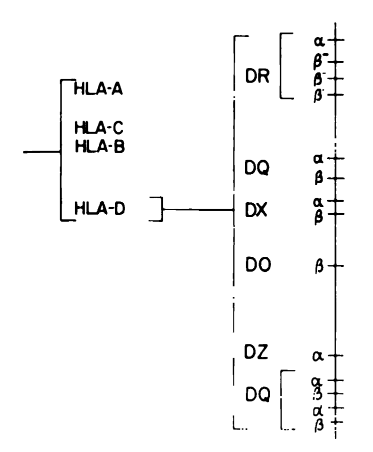


Bild 2 HLA-Region auf dem kurzen Arm des Chromosoms 6 beim Menschen

Fig. 2 HLA region on the short arm of human chromosome 6

sparaginsäure liegt in der dreidimensionalen Darstellung des HLA-
oleküls an stark exponierter Stelle (Bild 3), und es ist vorstellbar,
Stelle eine wichtige Rolle in der Erkennung gewisser Antigene
Suszeptibilität für Typ-1-Diabetes könnte also genetisch innerhalb

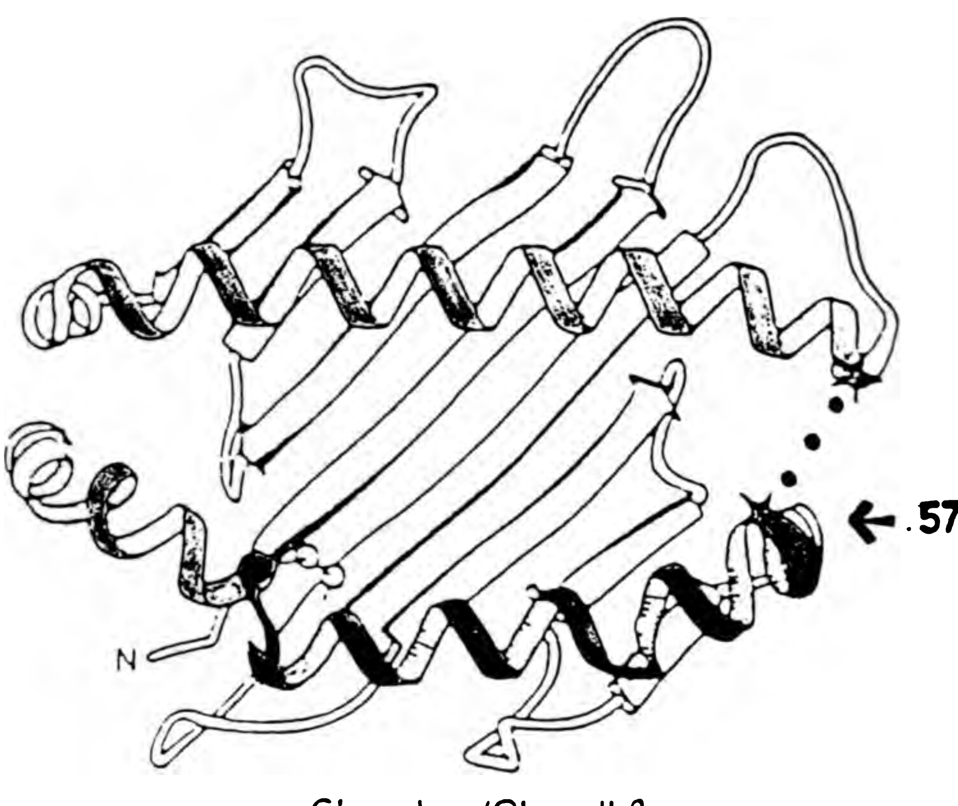


Bild 3 Schematische Darstellung eines HLA-Moleküls (nach Todd 1987)

Fig. 3 HLA molecule with indication of position 57

des HLA-DQ-Gens verankert sein. Seit kurzem wird diese Hypothese allerdings durch die Beobachtung wieder in Frage gestellt, dass bei japanischen Patienten mit Typ-1-Diabetes diese Asparaginsäure genauso häufig ist wie bei Kontrollgruppen.

Wie durch die Studien mit eineiigen Zwillingen angedeutet wurde, genügt ein genetisch determiniertes Risiko allein nicht für die Entwicklung eines Typ-1-Diabetes. Es braucht auslösende Faktoren.

Direkte auslösende Faktoren, also eigentliche Triggersubstanzen, sind zwar im Tierexperiment bekannt, bis jetzt jedoch nicht beim Menschen. Es gibt viele Hinweise, dass bisher nicht bekannte Umweltfaktoren eine zusätzliche Rolle spielen, um die autoimmune Betazellzerstörung in Gang zu setzen.

Dass man bisher trotz intensivster Suche in ausgedehnten, jahrelangen pidemiologischen Studien eine solche Triggersubstanz bis heute nicht idenifizieren konnte, ist etwas merkwürdig, etwas auffällig. Nerup (J. Nerup, 988) hat nun kürzlich eine faszinierende Hypothese entwickelt und mit ielen experimentellen Erkenntnissen untermauert, bei welcher der Autommunprozess nach unspezifischen Schädigungen der Betazellen durch rgendwelche Faktoren, wie z.B. Viren, Chemikalien, Lebensmittel, humorale ubstanzen und anderes, in Gang kommt, wobei Individuen mit erhöhter Suseptibilität oder Empfänglichkeit mit dem Immunsystem überreagieren. Die umme vieler solcher unspezifischer Stress-Situationen für die Betazellen rürde nach dieser Hypothese einen Mechanismus in Gang setzen, der zur auoimmunen Zerstörung der Betazellen führt. Der Trigger wäre also unspeziisch, seine Wirkung jedoch abhängig von der Empfindlichkeit des Immunsytems.

Die Betazellzerstörung durch autoimmune Mechanismen beginnt oft Aonate bis Jahre, in extremen Fällen bis zu 15 Jahre, vor dem Ausbruch des nanifesten Diabetes mellitus, denn die Geschwindigkeit der Destruktion der Betazellen ist individuell verschieden (Bild 1). Ein Individuum wird erst dann rank, wenn 85–90% der Betazellen zerstört sind. Die Latenzzeit ist im Durchchnitt länger bei Patienten, bei denen der Diabetes in der Adoleszenz oder m Erwachsenenalter auftritt, kürzer bei Auftreten schon im Kindesalter.

Gemäss dem Modell von Nerup, welches modifiziert und vereinfacht in Bild 4 dargestellt ist, beginnt die empfindliche Inselzelle, nachdem sie einem Trigger ausgesetzt worden ist, Antigene freizusetzen. Dieses postulierte Antien ist bisher nicht definitiv bekannt, könnte aber identisch sein mit einem Membranprotein mit einem Molekulargewicht von 64 000, das offenbar betaellspezifisch ist, also ein Protein, das man bisher nur in der Betazelle nachveisen konnte. Bei über 90% der neu diagnostizierten Typ-1-Diabetiker findet nan Antikörper gegen das 64-kDa-Protein im Serum (S. Baekkeskov, 1987). Diese Antikörper gelten als Marker für die Betazell-Zerstörung, da sie im Tier ınd auch beim Menschen oft lange vor der klinischen Manifestation eines Typ-1-Diabetes gefunden werden. Interessanterweise weisen einzelne Abchnitte dieses 64-kDa-Membranproteins eine strukturelle Ähnlichkeit mit gevissen Viren auf.

Das Immunsystem reagiert, das Antigen wird von immunologisch kompeenten Zellen erkannt und von Makrophagen aufgenommen, welche ihrerseits T-Helfer-Lymphozyten aktivieren. Die T-Helferzelle produziert Lymphokine, vodurch wiederum Makrophagen und Killerlymphozyten aktiviert werden. Killerzellen und Makrophagen produzieren schliesslich Interleukin-1 (IL-1) ınd Tumor Necrosis Faktor Alpha (TNFa). Diese beiden Faktoren sind in hoer Konzentration für die Betazelle direkt toxisch. Man konnte nachweisen, lass in von lymphatischen Zellen infiltrierten Inseln, einer Situation, wie sie eim neuentdeckten Diabetes gefunden wird, solche toxischen Konzentratioen von IL-1 und TNFa erreicht werden. Betazellen, welche beschädigt wur-

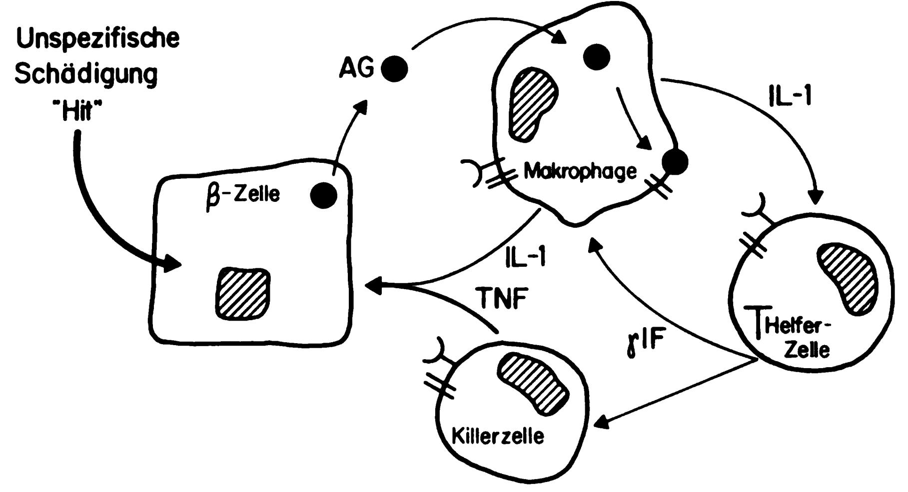


Bild 4 Hypothetisches Modell der Betazellzerstörung im Pankreas, vereinfacht nach Nerup.

Fig. 4 Hypothetical model of pancreatic beta cell destruction

den und aus diesem Grunde Antigene freisetzen, gehen durch diesen Prozess unter. Unbeschädigte Betazellen bleiben vorläufig erhalten.

Zusammengefasst wäre also das auslösende Moment in diesem Kreislauf die unspezifische Schädigung der Betazelle, wobei eine Überempfindlichkeit und Überreaktion der immunologisch kompetenten Zellen eine Zerstörung der Betazellen zur Folge haben. Die Möglichkeit zur Überreaktion und deshalb die Suszeptibilität für Typ-1-Diabetes wäre abhängig vom genetisch determinierten HLA-Typ und eventuell vom Vorhandensein der Asparaginsäure 57 des HLA-Moleküls.

Soweit diese aktuelle Hypothese der Pathogenese, die mit vielen Befunden im Einklang ist. Allerdings sind vor allem die epidemiologischen Erkenntnisse mit diesem hypothetischen Modell noch nicht gut verständlich.

Die Forschung in diesem immunologischen Teil der Diabetologie ist im Moment sehr intensiv. Im Hinblick auf eine in Zukunft eventuell mögliche Prävention des Typ-1-Diabetes ist es absolut notwendig, die Details der Pathogenese genau zu verstehen.

4 Eine Bemerkung zu Tierversuchen

Entscheidende Informationen über die Pathogenese des Typ-1-Diabetes ist Tiermodellen zu verdanken. So gibt es einen Mäusestamm, die NOD-Maus, und einen Rattenstamm, die BB-Ratte, bei denen sehr wichtige genetische und immunologische Untersuchungen durchgeführt werden können, da der

iabetes dieser beiden Tiermodelle jenem des Menschen in vielen Merk-
ıalen sehr ähnlich ist.

Tiermodelle sind hier nicht ersetzbar, und dies hat sogar uralte Tradition:
linkowski eruierte – wie erwähnt – den Effekt der totalen Pankreatektomie
ei einem Hund. Bei einer nach der vorgenommenen Operation durchgeführ-
n Kontrolle beschwerte sich Minkowski zunächst bei einem Tierwärter, dass
ieser die Tierbehausungen reinlicher halten solle, worauf der Wärter den
Vissenschaftler darauf aufmerksam machte, dass der betreffende Hund seit
er Operation sehr viel Wasser lasse und sehr viel trinke. Auf diese Art ent-
eckte Minkowski den Zusammenhang zwischen dem Fehlen des Pankreas
nd dem Diabetes mellitus.

Banting und Best konnten bei einem pankreatektomierten Hund in einem
ntscheidenden Experiment im April 1922 zeigen, dass das Extrakt aus den
ıseln der Bauchspeicheldrüse den Diabetes mellitus zum Verschwinden
rachte: Ihre berühmte Hündin Marjorie überlebte die Pankreatektomie dank
er Behandlung mit den ersten, noch unreinen Insulin-Präparaten. Die abso-
ıt essentiellen Experimente eröffneten nachfolgend den Ärzten die Möglich-
eit, die bis dahin tödlich verlaufende Krankheit Diabetes mellitus beim Kind
tsächlich zu behandeln.

Tierversuche sind auch in Zukunft nicht aus der Diabetes-Forschung weg-
ıdenken, denn in den nächsten Jahren wird es um die Möglichkeit der Ver-
nderung des Ausbruchs des Diabetes mellitus gehen. Wenn der Diabetes-
orschung dies gelingen wird, können in Zukunft viele Kinder und Jugend-
che vor dieser belastenden und schwerwiegenden Krankheit geschützt
erden.

Prävention des Typ-1-Diabetes?

um jetzigen Zeitpunkt ist eine echte Prävention trotz verschiedener – auch
inischer – Vorstösse noch nicht möglich. Die Erkenntnis, dass die Zer-
örung der insulinproduzierenden Zellen im Pankreas durch autoimmune
orgänge zustande kommt, führte hingegen zu therapeutischen Versuchen,
nd zwar mit immunsuppressiven Medikamenten.

An verschiedenen Punkten wäre es dabei nach experimentellen Erkenntnis-
en möglich, den Zerstörungskreislauf (Bild 4) zu unterbrechen. Diverse
nmunsuppressive Medikamente, insbesondere auch Cyclosporin A, wurden
ngewendet, sie haben sich jedoch wegen Wirkungslosigkeit oder schwerwie-
ender Nebenwirkungen als nicht brauchbar erwiesen (J.S. Skyler, 1987,
J. Schönle, 1989). Ein gewisser Optimismus ist aber erlaubt, denn bei der
IOD-Maus ist es bereits gelungen, mit entsprechenden Eingriffen ins
nmunsystem den Ausbruch des Diabetes mellitus zu verhindern. Wir gewin-
en also wieder neue, entscheidende physiologische und pathogenetische In-
ormationen anhand eines Tiermodelles, obwohl solche ersten Erkenntnisse

noch nicht unmittelbar auf den Menschen übertragbar sind. Vorläufig können wir beim Menschen den autoimmunen Prozess noch nicht unterbrechen, das heisst, die Betazellen gehen zugrunde und der Diabetes mellitus wird auftreten.

6 Psychologische Aspekte

Nach Ausbruch des manifesten Diabetes mellitus muss die Behandlung mit Insulin begonnen werden. Dies bedeutet 2–4 mal pro Tag eine Insulinspritze, mehrere Urin- und Blutzuckerkontrollen, ein starrer Tagesplan mit fixierten Esszeiten und eine genau berechnete und abgewogene Ernährung (E.J. Schönle, 1990), dies tagtäglich. Vorläufig ist keine unmittelbare Alternative in Sicht.

Ein enormer Aufwand also, der betrieben werden muss. Der Grund dafür liegt im Tückischen der Therapie mit Insulin, im Balanceakt zwischen zuviel und zuwenig. Der Blutzucker muss durch Insulin in möglichst normalen Grenzen gehalten werden. Zuviel Insulin führt zur Unterzuckerung, zur Hypoglykämie; eine schwere Hypoglykämie ist eine unmittelbar bedrohliche Situation, und häufige Hypoglykämien können die psychomotorische und kognitive Entwicklung beeinträchtigen.

Zuwenig Insulin anderseits bewirkt zu hohe Blutzuckerwerte, eine Hyperglykämie. Eine chronische Hyperglykämie verändert Strukturproteine im Körper, vor allem in den Blutgefässen, was später die gefürchteten Spätkomplikationen der Diabetiker wie Niereninsuffizienz, Retinopathie oder Neuropathie hervorruft.

Die Insulintherapie ist somit ein jahrzehntelanger Seiltanz, bei dem es gilt, Abstürze tunlichst zu vermeiden. Diabetische Kinder und deren Eltern sind sich dessen bewusst.

Wie erträgt das eine Familie, wie erträgt ein beispielsweise 6jähriges Mädchen eine solche invasive Therapie? Wie sind die psychologischen Auswirkungen auf dieses zwar diabetische, aber psychisch doch im Grunde genommen völlig normale Kind? Es muss im Spital erfahren, dass die Störung das ganze Leben lang bleiben wird. Es lernt, seinen Urin zu testen und sich selber in den Finger zu stechen, um den Blutzucker zu bestimmen. Hinzu kommt die spezielle Ernährung, bei der bestimmte Speisen – und dabei handelt es sich gerade um die beliebtesten, nämlich die Süssigkeiten – auf keinen Fall mehr gegessen werden dürfen. Dies sind enorme Eingriffe ins tägliche Leben sowohl des betroffenen Kindes als natürlich auch der ganzen Familie.

Für den Arzt ist es am Anfang der Krankheit relativ einfach, seine therapeutischen Forderungen zu begründen und durchzusetzen, denn es besteht ein Leidensdruck. Die Kinder spüren, dass sie schwer krank sind. Die Auswirkungen des Insulin-Mangels zu Beginn der Krankheit, dieser katabole Zustand, ist wahrscheinlich subjektiv schlimmer zu ertragen, als er objektiv beurteilbar ist. Diese Kinder scheinen die Schwere ihres Zustandes und das Abgleiten des körperlichen Wohlbefindens ins Leere zu ahnen.

Zu diesem Zeitpunkt sind also Kinder und Eltern genügend motiviert, um zu lernen, wie der Krankheit zu begegnen ist und wie das therapeutische Ziel der Normoglykämie, d.h. eines eigentlichen Normalzustandes durch Insulin-Ersatz, erreicht und eingehalten werden kann. In vielen Fällen ist dies dank grossem Aufwand und der strikten Anwendung der vielen gelernten Regeln möglich. Später beginnen dann aber die betreuerischen Probleme, die vor allem auf psychologische Auswirkungen der andauernden eingreifenden Therapie zurückzuführen sind.

Sich selbst eine Spritze zufügen ist eine Handlung gegen einen instinktiven Selbstschutz-Mechanismus. Eine solche Hürde zu überspringen, bereitet gerade Kindern immer wieder grosse Schwierigkeiten. Aber als Kontrast dazu ist es dann eindrücklich zu sehen, wie die Kinder strahlen und stolz sind, wenn sie das erste Mal dieses Hindernis überwunden haben und sich selbst das Insulin spritzen konnten. Ein erstaunliches, weil doch eigentlich widersinniges Phänomen.

Für grössere Kinder und Jugendliche wird das Spritzen und Testen zur alltäglichen Handlung. Schmerzen wegen des Stichs werden von Adoleszenten bei gezieltem Fragen als vernachlässigbar bewertet. Das Problem ist jetzt die Motivation, dieses strenge tägliche Therapie-Programm aufrechtzuerhalten, da man sich doch eigentlich wohl fühlt. Der gut eingestellte Diabetiker spürt körperlich nichts von seinem Leiden. Soweit ist dies erfreulich, denn es entspricht dem Therapieziel. In dieser Situation wird es für ein Kind und speziell für einen Jugendlichen jedoch oft enorm schwierig, den Normalzustand aufrechtzuerhalten. Es geht ihm ja gut, wozu denn der Aufwand!

Und wenn es den Patienten auch dann nicht beeinträchtigt, wenn er nicht gut behandelt ist, weil er sich beispielsweise immer etwas zuwenig Insulin spritzt oder weil er isst, was er nicht sollte, dann beginnen die Probleme.

Die Sorgenkinder der Diabetologie sind die Adoleszenten. Vor allem in der Pubertät sind Regeln doch da, um nicht eingehalten zu werden. Dazu kommen die Erklärungen und Forderungen des Arztes, der von den Spätschäden redet, die aber erst in 10 bis 20 Jahren eine Rolle spielen werden. Diese Perspektive ist für einen Jugendlichen zu weit entfernt. Was soll er sich da jetzt schon darum kümmern! Da dem Adoleszenten bewusst ist, dass die Qualität der Behandlung zu einem grossen Teil von ihm selbst, von seiner Sorgfalt, abhängt, handelt er bei Nichtbeachtung der Regeln chronisch wider sein eigenes besseres Wissen. Solche täglichen Situationen während eines ganzen Lebensabschnittes, während der Pubertät, setzen aber den Diabetiker unter einen andauernden psychischen Druck, der durch die gesellschaftliche Reaktionsweise noch verschärft wird. Ein Jugendlicher will sich nicht von seinen Alterskollegen unterscheiden (Bild 5).

Dabei sind adoleszente Diabetiker doppelt gefährdet: Als wären die normalen Pubertätsprobleme nicht genügend belastend, ist bekannt, dass sich Spätschäden gerade während der Pubertät bei schlechter Diabetes-Einstellung rasch entwickeln können, rascher als vorher.

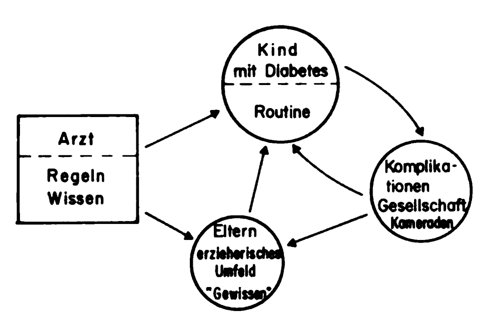


Bild 5 Das diabetische Kind und sein Umfeld
Fig. 5 The diabetic child and his environment

So ist es nicht erstaunlich, dass Studien vor allem aus den USA zeigen, dass beinahe die Hälfte der adoleszenten Diabetiker während der Pubertät Episoden von gravierenden psychischen Störungen, vor allem Depressionen, durchmachen. Als Folge davon nimmt die Qualität der Diabetes-Behandlung weiter ab, die der Adoleszente ja naturgemäss zu einem grossen Teil in eigener Regie führt. Der Teufelskreis schliesst sich.

Von unserer Warte aus stellen wir uns immer wieder etwas hilflos und verständnislos die Frage, wieso ein Patient mit einer lebensgefährdenden Krankheit oft solchen Widerstand gegen die medizinischen Massnahmen und Vorschriften zeigt? Wieso hat gerade der adoleszente Patient oft eine so schlechte Compliance? Versuchen wir, uns in ihn hineinzuversetzen: Das Ziel der Behandlung ist die Normoglykämie, der Arzt instruiert den Patienten entsprechend. Der Adoleszente lässt sich zunächst gut motivieren. Seine Erfahrung zeigt ihm aber bald, dass dieses Ziel nur sehr schwierig zu erreichen ist, oft nur mit eingreifenden Konzessionen an sein tägliches spontanes Leben. Der Adoleszente kommt zum Schluss, dass sich der Aufwand im Moment nicht lohnt, zumal er oft auch die Unsicherheit des Arztes spürt. Gegenüber den Vorschriften der Eltern hat er meist ohnehin eine prinzipiell oppositionelle Haltung.

Die Problematik des diabetischen Adoleszenten widerspiegelt die Schwachstellen der Therapie des Typ-1-Diabetes. An zwei wichtigen Punkten kann heute aber doch angesetzt werden: 1. Man muss versuchen, die Diabetes-Therapie dem adoleszenten Patienten anzupassen und nicht umgekehrt den Patienten in ein Therapieschema einzuengen. Dies ist heute mit der intensivierten Insulintherapie möglich. Der jugendliche Diabetiker erhält dadurch mehr Autonomie. Allerdings wird der Aufwand nicht kleiner. – 2. Wir müssen die Sicherheit vermitteln, dass sich eine gute Therapie tatsächlich lohnt. Diese Sicherheit ist heute garantiert, denn es gibt genügend gute Daten, die eine positive Korrelation zwischen guter Behandlung und vermindertem Risiko für Spätkomplikationen demonstrieren.

Sehr deutlich dargestellt wurde dies kürzlich (C.S. Shah, 1989). Aus ihren ausgedehnten Studien schliesst diese Gruppe, dass das Risiko, eine Retinopathie – also die gefürchtete Netzhautschädigung, die zur Blindheit führen kann – zu entwickeln, von der Diabetesdauer und der Höhe der durchschnitt-

lichen HbA1-Konzentration im Blut abhängt. Das glykosylierte Hämoglobin A1 ist eine Art Blutglucose-Gedächtnis und gilt als sensibler Indikator für Proteinveränderungen durch hohe Glucosespiegel, ist also ein Vorbote der diabetischen Spätschäden. Wenn das HbA1 gemäss dieser Studie durchschnittlich 1,5mal höher als normal ist, steigt das Risiko für die Retinopathie mit der Diabetesdauer fast exponentiell an. Anderseits ist dieses Risiko sehr gering, wenn das HbA1 normal oder nur leicht erhöht ist. Entsprechende Resultate finden diese Autoren auch für die Nephropathie. Das bedeutet, gut oder gar optimal behandelte Diabetiker leben besser und länger.

Dass unter einem den jugendlichen Diabetikern adäquaten Therapie-Schema, mit intensiver Schulung und Aufzeigen von Variationsmöglichkeiten tatsächlich auch Adoleszente besser behandelt werden können, weil sie dank mehr Eigenverantwortung eine bessere Compliance zeigen und sich damit die Ergebnisse verbessern, zeigen unsere eigenen Erfahrungen mit bisher 36 Jugendlichen unter Anwendung einer halbautomatischen Insulin-Spritze, dem sogenannten Insulin-Pen (E. J. Schönle, 1990): Der Verlauf des glykosylierten Hämoglobins A1 zeigt eine deutliche Verbesserung. So betrug das durchschnittliche HbA1 (normal $< 8\%$) bei jenen Adoleszenten, die nicht in Remission waren, vor der Umstellung $11{,}0 \pm 0{,}7\%$ ($n = 21$, SEM), nach 12 Monaten Basis-Bolus-Insulin-Regime mit dem Insulin-Pen $8{,}4 \pm 0{,}4\%$ ($n = 21$), nach 24 Monaten $8{,}8 \pm 0{,}6\%$ ($n = 14$), nach 36 Monaten $8{,}1 \pm 1{,}5\%$ ($n = 3$).

Es ist somit möglich, mit einem dem Lebensstil eines Jugendlichen angepassten Therapieregimes die Stoffwechsellage drastisch zu verbessern und über Jahre im oder nahe dem Normalbereich zu halten. Das Risiko für diabetische Spätschäden ist für diese Adoleszenten statistisch niedrig. Diabetische Kinder und Jugendliche müssen positiv erfahren, dass sich der Aufwand lohnt. Nicht zuletzt spielt bei dieser Altersgruppe der Arzt als kollegialer Berater, aber doch mit gewisser Autorität und mit fachlicher Kompetenz eine nicht unbedeutende, wenn oft auch unbequeme Rolle. Schulung, Training und anhaltende Motivationsschübe von aussen sind während der heiklen Pubertätsjahre wichtig.

Auf einfache Art und Weise geht es allerdings heute noch nicht. Die Therapie eines Typ-1-Diabetes ist eine aufwendige Angelegenheit, für das betroffene Kind bedeutet sie einen ärgerlichen Eingriff in das spontane tägliche Leben. Pessimismus ist aber dennoch fehl am Platz. Die Zukunftsperspektiven sind auf diversen Ebenen günstig.

7 Ausblick

In jüngster Zeit erworbene molekulargenetische Kenntnisse werden wahrscheinlich bereits in nächster Zukunft die Diabetes-Therapie beeinflussen. Mit einer Modifizierung des DNA-Codes können strukturell veränderte Insuline biosynthetisch produziert werden, deren Wirkungszeit im Organismus

besser berechenbar wird. Dies wird schon bald helfen, manches therapeutische Problem zu lösen. Eine Vereinfachung der Blutzuckerbestimmung zeichnet sich ebenfalls ab und die Herstellung einer künstlichen insulinproduzierenden Zelle – die eine Heilung bedeuten könnte – ist nicht mehr nur reine Phantasie. Im Tiermodell kann der Ausbruch der autoimmunen Störung bereits unterdrückt werden, und erste interessante Vorstösse sind auch beim Menschen unterwegs. Als erster kleiner Schritt in diese Richtung dürfte es sehr bald möglich sein, mit einem einfachen Test das Vorhandensein der Asparaginsäure an Position 57 der entsprechenden HLA-DQ-Proteine zu prüfen (M. Trucco, 1989), womit das wichtige frühe Erkennen von Personen mit erhöhtem Risiko für diese Krankheit sehr erleichtert würde. Ob schliesslich der Typ-1-Diabetes beim Kind ganz verhindert werden kann, wird uns die Forschung der nächsten Dekade zeigen. Molekulargenetische und immunologische Erkenntnisse können wahrscheinlich in Zukunft helfen, die heutigen, therapiebedingten psychologischen Probleme bei einem Kind mit Typ-1-Diabetes zu umgehen.

8 Literatur

Baekkeskov S., Landin M., Kristensen J.K., Srikanta S., Bruining G.J., Mandrup-Poulsen T., de Beaufort C., Soeldner J.S., Eisenbarth G., Lindgren F., Sundquist G., Lernmark A. (1987): Antibodies to a Mr 64 000 human islet cell antigen precede the clinical onset of insulin-dependent diabetes. J Clin Invest *79*, 926–934.

Barnett A.H., Eff C., Leslie R.D.G., Pyke D.A. (1981): Diabetes in identical twins. A study of 200 pairs. Diabetologia *20*, 87–93.

Bliss M. (1982): The discovery of insulin. The University Chicago Press.

Eisenbarth G.S., Connelly J., Soeldner J.S. (1987): The natural history of Type 1 Diabetes. Diabetes/Metabolism Reviews *3*, 873–891.

Nerup J., Mandrup-Poulsen T., Mølvig J., Helqvist S., Wogensen L., Egeberg J. (1988): Mechanism of pancreatic beta-cell destruction in Type 1 diabetes. Diabetes Care *11* (suppl. 1), 16–23.

Platz P., Jakobsen B.K., Morling N., Ryder L.P., Sveijgard A., Thomsen M., Christy M., Kromann H., Benn J., Nerup J., Green A., Hauge M. (1981): HLA-D and -DR Antigens in genetic analysis of insulin-dependent diabetes mellitus. Diabetologia *21*, 108–115.

Schönle E.J., Sizonenko P.C., Spinas G.A. (1989): Immunosuppression beim insulinabhängigen Diabetes mellitus. Schweiz. Ärztezeitung *70*, 451–452.

Schönle E.J. (1990): Moderne Aspekte der Therapie des insulinabhängigen Diabetes mellitus bei Kindern und Jugendlichen. Schweiz. Med. Wochenschrift, 120, 54–60.

Shah C.S., Malone J.I., Simpson N.E. (1989): A randomized trial of intensive insulin therapy in newly diagnosed insulin-dependent diabetes mellitus. New Engl J Med *320*, 550–554.

Skyler J.S. (1987): Immune intervention studies in insulin-dependent diabetes mellitus. Diabetes/Metabolism Reviews *3*, 1017–1035.

Todd J.A., Bell J.I., McDevitt H.O. (1987): HLA-DQb gene contributes to susceptibility and resistance to insulin-dependent diabetes mellitus. Nature *329*, 599–604.

Trucco M., Fritsch R., Trucco G., Turco E. (1989): A simple test to quickly ascertain the presence of Asp in position 57 of HLA-DQ beta chain alleles in the siblings of IDDM patients. Diabetes *38*: suppl. 2, 75.

PD Dr. E.J. Schönle, Universitäts-Kinderklinik, Steinwiesstr. 75, CH-8032 **Zürich**

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/3*: 169–190

Systeme zur transdermalen Therapie: Wege, Chancen und Grenzen[1]

Hans P. Merkle, ETH-Zürich

Wie wenige andere Beispiele zeigen die seit einiger Zeit zu beobachtenden Fortschritte und Rückschläge auf dem Gebiet der Entwicklung von Arzneiformen zur transdermalen Aufnahme von Arzneistoffen die Komplexität moderner pharmazeutischer Forschung. Die Grundlagen zu diesem Gebiet umfassen u.a. die Anatomie und Biochemie der Haut, die Polymerchemie relevanter Polymere, die Herstellung mehrfach geschichteter Polymerpflaster und die Pharmakokinetik und Pharmakodynamik bei langfristiger Zufuhr von Arzneistoffen. Einfluss haben auch Fragen der lokalen Veränderung der Haut durch sog. Absorptionsbeschleuniger, die Steuerung der Diffusion in mehrschichtigen Systemen und die thermodynamische Aktivität von Arzneistoffen in Abhängigkeit ihrer Träger. Ausschlaggebend sind schliesslich Fragen der Arzneimittelsicherheit und ihre Risiken. Es ist das Ziel dieser Arbeit, deutlich zu machen, dass diese Fragen nur durch einen interdisziplinären Ansatz bearbeitet werden können, wobei sich Fortschritte wegen der engen Randbedingungen nur sehr langsam erzielen lassen.

Delivery Systems for Transdermal Therapy: Approaches, Chances and Limits

There are not many fields in drug formulation where the complexity of modern pharmaceutical research can be so clearly demonstrated as by the sequence of ups and downs taking place in the field of transdermal delivery system development. The basics to this area include the anatomy and biochemistry of the skin, the polymer chemistry of relevant polymers, the manufacturing of laminated polymer patches and the pharmakokinetics and pharmacodynamics of controlled delivery of drugs. Equally important are questions about the effect of so-called absorption enhancers on the integrity of the skin, the mechanisms of transport control in laminate systems and how to affect the thermodynamic activity of drugs in relevant carriers. The essential question, however, is concerned with the safety and the risks of such therapy. This work is aimed to illustrate the need for a multi-disciplinary approach to make progress become possible in spite of rather narrow boundary conditions.

1 Einführung

Transdermale Freigabesysteme sind pflasterähnliche Arzneiformen zur Applikation auf der Haut. Das Ziel eines solchen Freigabesystems ist etwa folgendes: Es ist dazu bestimmt, Arzneistoff aus der Arzneiform in kontrollierter Weise durch die Haut in den Organismus abzugeben. Damit ist die Möglichkeit verbunden, Zufuhr des Arzneistoffs und Therapie über längere Zeit aufrechtzuerhalten. Dies kann eine Reihe von Vorteilen aufweisen:

- Es vermindert Nebenwirkungen, die sich aus ausgeprägten Blutspiegelspitzen erklären, wie sie sich bei mehrfach täglicher Dosierung von Arzneistoffen einstellen können.

[1] Erweitert nach einer Einführungsvorlesung vom 30. Januar 1990 im Auditorium maximum der ETH Zürich.

- Es gestattet relativ gleichmässige Blutspiegel auch dann, wenn Arzneistoffe nur eine sehr kurze biologische Halbwertzeit haben, d.h. normalerweise sehr rasch ausgeschieden und/oder metabolisiert werden.
- Es umgeht den nach gastrointestinaler Absorption oft zu beobachtenden starken Abbau des Arzneistoffs bei der ersten Leberpassage (first-pass effect).
- Die geringe Applikationsfrequenz übt letztlich einen günstigen Einfluss auf den Patienten aus, sich der Therapie regelmässig zu unterziehen («Compliance»).

Obwohl die therapeutische Behandlung mit transdermal zugeführten Arzneistoffen Bestandteil des historischen Arzneischatzes z.B. in Europa und in Asien ist, stellt die Anwendung von sog. transdermalen Systemen einen wichtigen Markstein in der Entwicklung neuer Arzneiformen dar. Erste Patentierungen erfolgten Anfang und Mitte der siebziger Jahre. Erste Handelsprodukte kamen dann jedoch erst etwa 10 Jahre später, begleitet von einem immer noch anhaltenden Boom an wissenschaftlichen Publikationen und Mitteilungen. Einen Überblick über die wissenschaftliche Literatur geben Y.W. Chien (1987) und J. Hadgraft und R.H. Guy (1989), eine Übersichtsarbeit findet sich bei H.P. Merkle (1989). Die etwa Mitte der achtziger Jahre ausgebrochene Euphorie ist abgeflacht, insbesondere weil sich die Zahl der für transdermale Therapie zugänglichen Arzneistoffe doch sehr in Grenzen hält. Ausschlaggebend dafür sind etwa folgende Gründe:

- Die Haut ist nur für wenige Arzneistoffe so durchlässig, dass sich therapeutisch wirksame Blutspiegel erreichen lassen. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da Arzneistoffe in aller Regel für die perorale Applikation oder für die Injektion entwickelt werden, nicht aber für den transdermalen Einsatz.
- Manche Arzneistoffe verlangen aus therapeutischen oder pharmakodynamischen Gründen ein An- und Abfluten ihres Blutspiegels oder führen bei langanhaltender, gleichmässiger Zufuhr zur Gewöhnung.
- Der Kontakt der Haut mit Freigabesystemen und die transdermale Zufuhr von Arzneistoffen können zur Sensibilisierung der Haut führen.
- Die sichere Befestigung von arzneistoffhaltigen Pflastern auf der Haut über Perioden von einem bis mehreren Tagen ist teilweise schwierig, z.B. bei feuchter Haut.
- Die transdermale Therapie ist wegen der hohen Kosten für die Trägersysteme eine teure Therapie. Dies verlangt markante therapeutische Vorteile gegenüber konventionellen Arzneiformen, die sich nicht immer einstellen.

Aufgrund dieser Nachteile hat sich die Zahl der von den Gesundheitsbehörden registrierten transdermalen Pflaster nicht so stark erhöht, wie dies noch vor Jahren angenommen wurde. Interessant sind aber nach wie vor besonders folgende Indikationsgebiete:

- Herz/Kreislauferkrankungen, z.B. zur Behandlung und Prophylaxe der Angina pectoris bzw. des Bluthochdrucks.
- Hormonsubstitution, z.B. besonders Estradiol.

· Schmerzbehandlung, z. B. Fentanyl bei Tumoren.

Interessante zukünftige Anwendungen sind z. B. auch die Alzheimersche ınd die Parkinsonsche Krankheit.

Die Haut

.1 Anatomie und Feinstruktur

)ie Haut (D. L. Bisett, 1987) besitzt eine Dicke von – lokal unterschiedlich – twa 3 mm; sie besteht von aussen nach innen aus der Epidermis, der Dermis nd der Hypodermis. Die Dermis ist der Sitz der Blut- und Lymphkapillaren nd der Nervenendigungen. Die Hypodermis beherbergt einen Teil der chweissdrüsen und das Unterhautfettgewebe. Die Hauptbarriere gegen die 'enetration von Arzneistoffen ist jedoch die Epidermis mit einer Dicke von ur 50–80 µm.

Sie besteht nur zum Teil aus lebenden Zellen: Dies sind hauptsächlich die on der Basalschicht gebildeten Keratinocyten. Ein Reifungsprozess dieser ;ellen führt über Formveränderungen allmählich zu einer immer stärker werenden Abflachung und schliesslich zu einem Absterben der Zellen. Übrig leiben die sog. Corneocyten. Dieser Prozess ist mit einer biochemischen Reiıng verbunden, die zur Bildung und Anreicherung von Keratin in den Zelэn, verbunden mit einer Abgabe von Lipiden aus den Zellen, führt. Es bildet ich eine Schicht aus den keratinreichen Überresten der Zellen, eingebettet in ine Lipidmatrix. Für diesen Endzustand wurde auch der Begriff des *Backtein-Mörtel-Modells* (B. W. Barry, 1987) geprägt, welches im Verlauf der Darзgung von Absorptionsverbesserern nochmals aufgegriffen wird. Die Epiderıis wird durch Abschuppen der obersten Zellreste fortlaufend abgetragen, ildet sich aber an der Basalmembran ständig neu aus. Sie erneuert sich etwa n Zeitraum von 25 Tagen. Abschuppen und Erneuerung stehen im Gleichge/icht.

.2 Die Haut als Barriere

)ie geschilderte Schicht von nur etwa 20 µm Dicke, d. h. die Hornschicht ıder das Stratum corneum, besitzt trotz ihrer Zartheit eine äusserst wichtige ıhysiologische Funktion. Sie ist sehr wenig durchlässig für Wasserdampf und chützt den Organismus daher vor sonst tödlicher Austrocknung. Andererseits st sie in der Lage, viele toxische Verbindungen trotz direktem Kontakt wir:ungsvoll fernzuhalten. Was nicht heisst, dass manche Stoffe nicht in toxichen Dosen die Haut permeieren können. Historisch bekannt sind etwa die lexensalben, deren Kräuterextrakte, etwa aus der Alraune oder aus dem Bilenkraut, so wirkungsvoll durch die Haut dringen konnten, dass sich bei ihren ınwendern Halluzinationen und psychedelische Erlebnisse einstellten. Belegt

sind auch historische Fälle, bei denen Tabak-Schmuggler durch die auf den Körper gebundenen Tabakpflanzen an Nikotinvergiftung zu Tode kamen.

Überwiegend bildet das Stratum corneum jedoch eine äusserst wirksame Barriere; es ist damit eigentlich kein Aufnahmeorgan für Arzneistoffe. Werden Arzneistoffe aber tatsächlich absorbiert, können sie, ähnlich wie in der Leber, doch meist nicht mit derselben Effizienz, metabolisch abgebaut werden. Man schätzt die metabolische Aktivität der Haut nur auf etwa 10% der der Leber ein.

2.3 Die Haut als immunologisches Organ

Ein für die Beurteilung der transdermalen Arzneistoffzufuhr wichtiger Gesichtspunkt ist die Eigenschaft der Haut als immunologisch aktives Organ und Teil des Immunsystems (D. H. Lynch, 1987). Ein grosser Teil der in der Haut vorgefundenen Zellen ist daran beteiligt: Die Keratinocyten, der überwiegende Zelltyp in der Epidermis, produziert relativ grosse Mengen an immunologischen Mediatoren, z. B. IL-1. Die aus dem Knochenmark stammenden Langerhans-Zellen beteiligen sich an der Präsentierung des Antigens, Makrophagen und Granulocyten an der Phagozytose, und Mastzellen können Histamin abgeben und sind für die allergischen Reaktionen vom Typ der «Sofortreaktionen» verantwortlich. Fibroblasten und die Endothelzellen der Gefässe schliesslich nehmen auch an der Präsentierung der Antigene teil.

Als Teil des immunologischen Apparats ist die Haut als die Achilles-Ferse der transdermalen Therapie bezeichnet worden (D. H. Lynch et al., 1987). Darin kommt die Befürchtung zum Ausdruck, dass die Haut durch ihre häufige Exposition mit Wirkstoffen zu einer T-Lymphozyten-vermittelten Überempfindlichkeit vom verzögerten Typ veranlasst werden kann, die zu einer allergischen Kontakt-Dermatitis führt. Möglich erscheint auch eine Neutralisierung des Arzneistoffs durch Antikörper. Es besteht die Gefahr, dass diese Immunität in den betroffenen Patienten zu einer generellen Wirkungslosigkeit des jeweiligen Arzneistoffs führen könnte, auch dann, wenn der Wirkstoff dem Organismus auf eine andere als auf transdermale Weise verabreicht wird.

Die bisher beobachteten allergischen Reaktionen sind überwiegend vom verzögerten Typ. Bei der transdermalen Applikation des Blutdrucksenkers Clonidin (G. S. Perlmutter et al., 1987) wurden z. B. immerhin bei 5 bis 42% der Probanden solche allergischen Reaktionen beobachtet. Bedrohliche Sofortreaktionen von anaphylaktischem Ausmass als Folge einer transdermalen Therapie wurden zum Glück bisher noch nicht bekannt. Insgesamt ist die Wahrscheinlichkeit zu allergischen Komplikationen nach transdermaler Therapie aber deutlich grösser einzuschätzen als bei klassischen Applikationsarten, z. B. der peroralen Zufuhr oder der Injektion. Das Datenmaterial dazu ist jedoch noch gering.

3 Formulierung und Herstellung transdermaler Freigabesysteme

3.1 Aufbau

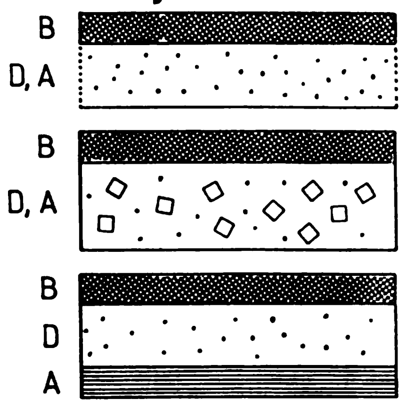
Entsprechend ihrem Aufbau unterscheidet man bei transdermalen Pflastern zwischen den beiden mittlerweile klassischen Konzepten der *Matrix-* und der *Membran-Systeme* (H. P. Merkle, 1989). Eine Übersicht dazu gibt Bild 1. Matrix- sowie Membran-Systeme bestehen zunächst aus einer Grund-Folie als Träger, die für den Arzneistoff undurchlässig ist. Bei einem Matrix-System wird die Trägerfolie im einfachsten Fall mit einer haftfähigen Polymer-Matrix beschichtet, die den Wirkstoff enthält. Der Wirkstoff kann in gelöster, kristallin dispergierter Form oder an ein unlösliches Sorbens gebunden vorliegen. Ist die Matrix auf der Haut nicht haftfähig, kann die mit Wirkstoff angereicherte Schicht mit einer Haftschicht beschichtet werden. Alternativ kann die Arzneiform auch mit einem Haftring ausgestattet werden. Sie haftet dann aber nur peripher. Schwammartige Matrizen können mit haftfähigen Flüssigkeiten beladen werden.

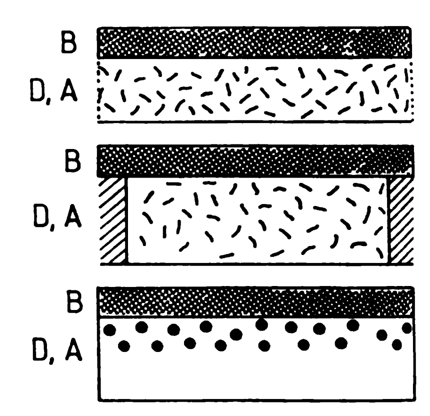
Grösstenteils ähnlich aufgebaut sind die sog. Membran-Systeme. Ausser dem bereits bekannten Aufbau besitzen sie zwischen der Schicht mit dem Wirkstoffdepot und der Haftschicht eine Membran, wobei es sich entweder um kontinuierliche oder um poröse Membranen handeln kann, je nachdem ob der Wirkstoff die Membran durch Diffusion, durch ihr Kontinuum oder durch die Poren permeieren soll. Die Poren können mit dem Medium des Wirkstoffdepots beladen sein, aber auch mit anderen flüssigen oder festen Stoffen. Die Funktion einer Membran wird oft darin bestehen, zu versuchen, der Abgabe von Wirkstoff aus dem System eine weitere Barriere entgegenzustellen. Die Membran kann aber auch zu dem Zweck eingesetzt werden, flüssige Medien einzuschliessen, z. B. die Suspension eines Arzneistoffs in einem Lösungsmittel.

3.2 Herstellung

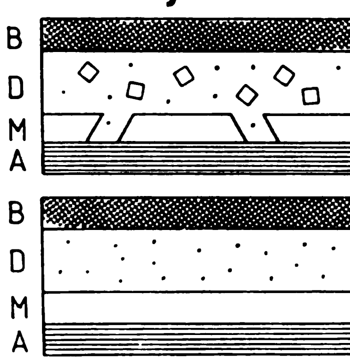
Die Techniken, die zur Herstellung von transdermalen Pflastern eingesetzt werden, sind keine klassischen pharmazeutischen Herstellungsverfahren wie etwa das Tablettieren oder die Herstellung von Suppositorien. Berührungsflächen gibt es lediglich mit den Techniken zur Beschichtung von Wundpflastern. Darüber hinaus stammen die Verfahren aus der Verpackungstechnik und aus der Herstellung technischer Klebebänder. Wegen der hohen Standards bezüglich Qualitätskontrolle, Prozess-Validierung und Stabilität bedeutet die Übernahme solcher Techniken aber eine beträchtliche Herausforderung für die industrielle pharmazeutische Praxis, die nur von wenigen Herstellern beherrscht wird. Etwa drei Standard-Techniken sind etabliert:

Aus der Verpackungstechnik kommt ein Verfahren, welches durch den Prozessablauf *Formen-Füllen-Versiegeln* gekennzeichnet wird: einem durch Walzen bewegten Band aus geeignetem Polymermaterial werden mit Hilfe von





Membran-Systeme



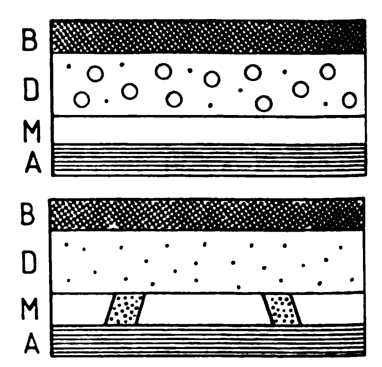


Bild 1 Aufbau von Matrix- und Membran-Systemen. B: Grundfolie, D: arzneistoffhaltige Schicht, A: Haftschicht, M: Membran. *Matrix-Systeme.* Linke Seite, von oben nach unten: haftfähige Matrix mit gelöstem Wirkstoff; haftfähige Matrix mit suspendiertem oder adsorbiertem Wirkstoff; nicht-haftfähige Matrix mit zusätzlicher Haftschicht. Rechte Seite: poröse Scheibe mit haftfähigem Gel oder Flüssigkeit gefüllt; poröse Scheibe mit nicht-haftfähigem Gel oder Flüssigkeit, aber mit peripherem Haftring; haftfähige Matrix mit Feststoffgradient. *Membran-Systeme.* Linke Seite, von oben nach unten: mikroporöse Membran, mit Arzneistoff in suspendierter oder adsorbierter Form; kontinuierliche Membran, mit Arzneistoff in gelöster Form. Rechte Seite: kontinuierliche Membran, Arzneistoff in Kompartimente eingeschlossen; mikroporöse Membran, Poren beladen mit flüssigem oder festem Medium.

Fig. 1 Cross sections of matrix and membrane systems. B: backing layer, D: drug depot layer, A: adhesive layer, M, membrane. *Matrix systems.* Left side: from top to bottom: adhesive matrix with dissolved drug; adhesive matrix with suspended or adsorbed drug; non-adhesive matrix with additional adhesive layer. Right side: porous pad filled with adhesive gel or liquid; porous pad filled with non-adhesive gel or liquid but equipped with peripheral adhesive ring; adhesive matrix with drug bulk gradient. *Membrane systems:* Left side, from top to bottom: microporous membrane, drug suspended or adsorbed; continuous membrane, drug dissolved. Right side: continuous membrane, drug enclosed in microcompartments; microporous membrane, pores loaded with liquid or solid medium other than in drug depot.

Druck und Wärme flache Vertiefungen eingeprägt, die mit einem wirkstoffhaltigen Gel oder einer Flüssigkeit gefüllt und mit einem Polymerfilm versiegelt werden. Darauf können weitere Schichten aufgetragen werden, z. B. Haftschichten und/oder den sog. release liner, eine Schicht, die die Arzneiform während der Lagerung dicht abschliesst. Sein Ende findet der Prozess damit, dass die individuellen Arzneiformen aus dem Band ausgestanzt und verpackt werden.

Beim *Lösungsmittelverfahren* wird eine Lösung eines Polymeren einschliesslich Arzneistoff und Zusätze mit Hilfe von Rakeln auf ein auf Walzen transportiertes Polymerband aufgetragen und durch eine Trockenkammer geschleust. Dabei wird das Lösungsmittel entfernt, und es entsteht ein mit Arzneistoff beladenes Laminat. Es folgt das Zuschneiden und das Verpacken (H.-M. Wolff et al., 1987). Diese Technik wird als sehr wirtschaftliche Methode angesehen. Sie verlangt jedoch die Rückgewinnung grosser Mengen an teilweise toxischen und umweltschädlichen Lösungsmitteln, was mit entsprechend grossem Aufwand verbunden ist. Bei vielen Lösungsmitteln muss ein ausreichender Explosionsschutz eingeplant werden. Um die Verwendung von organischen Lösungsmitteln zu umgehen, können auch wässrige Polymerdispersionen mit Filmbildeeigenschaften eingesetzt werden, wie sie in ähnlicher Art bereits bei der Beschichtung von Drageekernen Verwendung finden.

Ein weiteres Verfahren besteht darin, dünne feinporige Scheiben eines elastischen Trägermaterials mit flüssigen Zubereitungen von Arzneistoffen zu tränken *(«adsorbent pad approach»)*. Dies kann durch weitere Beschichtungen ergänzt werden (undurchlässige Trägerfolie, Membran, Klebeschicht etc.). Am Ende stehen wieder Zuschneiden und Verpacken. Als Alternative können statt der porösen Scheiben auch bereits mit Arzneistoff vorbeladene Trägerscheiben eingesetzt werden.

Neben diesen Standard-Techniken macht man sich zunehmend Gedanken, auch andere Verfahren einzusetzen. Dies erklärt sich in erster Linie aus wirtschaftlichen Gründen. Die Herstellungskosten transdermaler Pflaster liegen um etwa den Faktor 10 über den Kosten für klassische Arzneiformen. Vereinfachungen bei der Herstellung würden den Kostendruck mindern können. So könnte z. B. versucht werden, Lösungsmittel und somit auch Trocknungsprozesse zu vermeiden. Dies könnte z. B. durch Verwendung schmelzfähiger Polymere erreicht werden, die durch *Extrusion* in geschmolzenem Zustand zu Filmen ausgezogen oder auf eine Trägerfolie aufgetragen werden können *(Hotmelt-Verfahren)*. Ausserdem gibt es Überlegungen, Polymerschmelzen mit einer Art *Siebdruckverfahren* auf Trägerfolien zu schichten. Der Vorteil dieses Verfahrens wäre die Möglichkeit zu den verschiedensten Druckmustern und die Trennung zwischen Wirkstoff-, Haft- und unbeschichteten Bereichen, welche z. B. einen eher ungestörten Austausch der Hautfeuchtigkeit mit der Umgebung ermöglichen würden, während die bisherigen Systeme mit durchgehender Beschichtung zu einer exzessiven Okklusion der Haut führen können, was bei langem Tragen leicht lokale Infektionen und Irritationen verursacht.

3.3 Auswahl der Polymermaterialien

Für die Auswahl der Polymere (R.W. Baker und G. Heller, 1989) zur Herstellung von transdermalen Pflastern steht im Prinzip ein enorm vielfältiges Angebot zur Verfügung. Entscheidungskriterien sind z.B. Diffusionseigenschaften, Verteilung und Löslichkeit des jeweiligen Arzneistoffs im Polymeren. Für Trägerfolien werden beispielsweise sehr undurchlässige Polymere verlangt, während Matrix-Polymere je nach Anforderungsprofil für den Arzneistoff einmal mehr oder auch weniger durchlässig sein sollten. Die für Haftschichten einsetzbaren Polymere sollten Arzneistoffe dagegen sehr gut durchlassen.

Eine der wichtigsten Forderungen betrifft die Toxizität der Polymeren und aller weiteren Zusätze, wie Stabilisatoren, Harze, Weichmacher, Pigmente, Füllstoffe etc. Die Verwendung in einem Arzneimittel engt die Bandbreite der möglichen Rohstoffe ausserordentlich ein, da nur wenige Polymere bzw. Polymerzubereitungen ausreichend toxikologisch untersucht und als hautverträglich anerkannt sind. Die Zulassung neuer Polymere bei den Gesundheitsbehörden ist enorm aufwendig und kostenintensiv. Die Auswahl geeigneter Träger-Polymere ist daher eher eingeschränkt, hält sich in der Regel an bereits Eingeführtes und lässt in der Praxis nur dosierte Kreativität zu.

Als haftfähige Polymere (M.C. Musolf, 1987) kommen z.B. im Prinzip nur drei verschiedene Typen in Frage. Dies erklärt sich aus den recht extremen Anforderungen. Haftpolymere für transdermale Pflaster sollen wegen ihres unmittelbaren Kontakts zur Haut nicht nur hoch biokompatibel sein, sie sollen ihre Hafteigenschaften auch bei extremen Bedingungen bewahren, sogar auf fetter, feuchter, behaarter und runzliger Haut. Ihr Haftvermögen sollte gegen Wasser und Feuchtigkeit widerstandsfähig sein, gleichzeitig sollten sie sich ohne Rückstände von der Haut entfernen lassen und für Wasserdampf möglichst durchlässig sein. Bei den dazu fähigen Polymeren handelt es sich um:

- Poly(isobutylen): Dieses Polymer bildet die klassische Alternative, hat aber einige Nachteile. Es erhält seine Funktion nur in einer komplexen Mischung von Harzen, Wachsen, Füllmitteln und Weichmachern; es ist chemisch instabil und verlangt daher den Einsatz von Stabilisatoren. Ausserdem hat es eine Tendenz zur Allergisierung der Haut.
- Poly(acrylate): Polyacrylate haben den Vorteil, dass sie keine Zusätze erfordern, sie sind ausserdem relativ stabil und hypoallergen. Allerdings sind sie oft nicht genügend durchlässig.
- Silikone: Sie bestehen aus einem linear polymerisierten Flüssiganteil und einem niedermolekularen, aber vernetzten Harzanteil. Sie gelten als besonders wenig allergen, ihr Preis führt aber dazu, dass sie noch so gut wie nicht eingesetzt werden.

4 Einige Beispiele

4.1 Nitrat-Pflaster

Die Einführung der sog. Nitrat-Pflaster mit Nitroglycerin als Wirkstoff zu Anfang der achtziger Jahre war ein Markstein in der jungen Geschichte der transdermalen Pflaster. Sie sollten eine sichere Prophylaxe gegen Angina pectoris ermöglichen. Zum ersten Mal konnte gezeigt werden, dass derartige Präparate am Markt tatsächlich Bestand haben können. Dies löste eine teilweise fieberhafte Tätigkeit auf dem Forschungs- und Entwicklungssektor aus. Dabei wurde u.a. jedoch auch recht schnell erkannt, dass das gleichmässige transdermale Einschleusen von Nitroglycerin in den Körper innerhalb von einer bis zwei Wochen zu einer Gewöhnung führt (Toleranz), wobei das Präparat seine Wirkung verliert. Nach Absetzen des Präparats stellt sich die Wirkung allerdings in kurzer Zeit wieder ein (S. Chong und H.-L. Fung, 1989).

Seit kurzem geht man daher dazu über, Pflaster zu konzipieren, die nur über 10–15 Stunden Wirkstoff abgeben. Bis zur Applikation des nächsten Pflasters nach 24 Stunden nähern sich die physiologischen Bedingungen dann dem Normwert. Die erneute Applikation verläuft daher ohne jede Gewöhnung, das Medikament behält seine Aktivität (Bild 2). In allerjüngster Zeit wird auch dieser Ablauf in Frage gestellt, da die Nitratprophylaxe gerade in den frühen Morgenstunden besonders dringlich ist. Ideal wäre somit ein Freigabeverlauf, der in dieser Zeit ein Maximum aufweist, im Laufe des Nachmittags und des Abends abfällt bzw. endet und erst wieder gegen Morgen einsetzt. Eine praktikable technische Lösung dieser Kinetik zeichnet sich bisher noch nicht ab.

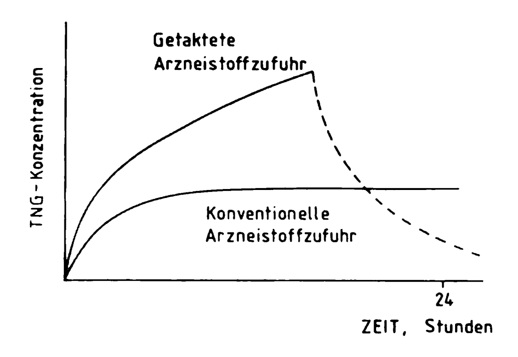


Bild 2 Konventionelle gleichmässige bzw. getaktete Zufuhr von transdermalem Nitroglycerol im Verlauf von 24 Stunden (S. Chong und H.-L. Fung, 1989).

Fig. 2 Conventional constant and pulsed delivery of transdermal nitroglycerol during 24 hours (S. Chong and H.-L. Fung, 1989).

Interessant an diesem Beispiel ist, dass die neuartige Kinetik solcher Arzneiformen offenbar zu Erkenntnissen auf anderen Wissensgebieten führt, welche ohne solche Anstösse nicht zugänglich wären. So sind es in diesem Fall neue Erkenntnisse über die Pharmakodynamik nach langanhaltender Zufuhr herzwirksamer Nitrate, die in Einklang mit der tageszeitlich unterschiedlich starken Gefährdung der Patienten zu bringen sind. Dies wirft die Frage auf, ob nicht auch andere schon bekannte Wirkstoffe eine veränderte Pharmako-

dynamik zeigen, wenn sie nicht intermittierend, sondern gleichmässig über längere Perioden zugeführt werden. Es scheint so zu sein, dass solche Fragestellungen erst jetzt an Bedeutung gewinnen, seit es gelingt, Arzneistoffe in dieser Weise zu applizieren. Andererseits werden die damit gewonnenen Erkenntnisse ihrerseits wiederum zu Herausforderungen für die sachgerechte Arzneiformung solcher Stoffe führen.

4.2 Nikotin-Pflaster

Im Prinzip ist Nikotin zwar pharmakologisch äusserst wirksam, wegen seiner Nebenwirkungen aber als Arzneimittel völlig untauglich. Dies ändert sich möglicherweise, wenn es gelingt, Nikotin als Therapeutikum gegen die Sucht des Rauchens einzusetzen. Diese besteht wohl darin, dass der Raucher den kurze Zeit nach der letzten Zigarette erfolgenden Abfall seines Nikotin-Blutspiegels als unangenehm bis schmerzlich empfindet, was ihn dazu veranlasst, sich eine neue anzustecken. Dies will man ihm nun mit transdermalen Nikotin-Pflastern abgewöhnen (G. Buchkremer und E. Minneker, 1989). Was nun zuerst so aussieht, als wolle man den Teufel mit dem Beelzebub austreiben, hat durchaus einen Sinn. Ein gleichmässiger, transdermal erzeugter Nikotin-Blutspiegel weit unterhalb der beim Rauchen erreichten Spitzenwerte dämpft offenbar die Sucht des Rauchers nach der nächsten Zigarette. Dass dies kein Patentrezept ist, zeigt eine Studie mit transdermalem Nikotin (Bild 3). Es geht um eine neunwöchige Studie (G. Buchkremer und E. Minneker, 1989), bei der transdermales Nikotin mit einer psychologischen Betreuung kombiniert wurde. Verglichen wurden gegen eine Placebo-Gruppe und eine Kontroll-Gruppe, die allein psychologisch betreut wurde. Das Ergebnis macht zwar deutlich, dass auch die Gabe eines Placebos und/oder eine psychologische Behandlung bei einem Teil der Versuchspersonen zum Ziel führt. Die transdermale Nikotinbehandlung ist jedoch beiden deutlich überlegen und verbessert die Bereitschaft zur Abstinenz merklich, wenngleich nicht grundsätzlich.

4.3 Transdermales Theophyllin

Die ärztliche Betreuung von Frühgeborenen verlangt in vielen Fällen eine medikamentöse Unterstützung der Atemtätigkeit. Ursache ist die oft ungenügende Entwicklung des Lungenapparats. Einer der möglichen Arzneistoffe ist das Theophyllin. Diesen Arzneistoff über viele Tage richtig zu dosieren ist jedoch nicht einfach. Auf herkömmliche Weise wird er injiziert, was bei Frühgeborenen sicher keine optimale Lösung ist. Ausserdem führen Injektionen zu überschiessenden Blutspiegeln, deren Spitzen zu Nebenwirkungen (> 12 µg/ml) [illegible]hren können. Bei Theophyllin sind dies etwa Tachycardie, zentrale Erre[illegible]g und Übelkeit. Viel gleichmässiger kann Theophyllin, ohne eine Infusion [illegible]egen zu müssen, auch durch transdermale Absorption aufgenommen wer[illegible]i Frühgeborenen vor allem deshalb, weil ihre Haut noch wenig entwik-

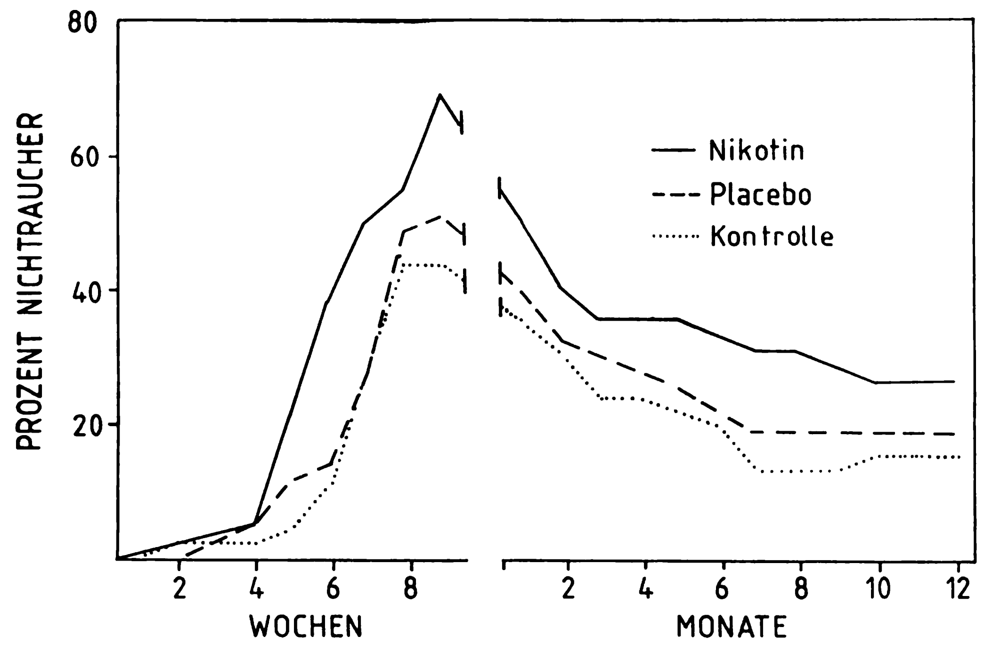


Bild 3 Abstinenzverhalten von Rauchern während einer 9wöchigen Behandlung mit transdermalem Nikotin bzw. Placebo, ergänzt durch eine psychologische Behandlung; anschliessend weiterer Verlauf der Abstinenz innerhalb eines Jahres (nach G. Buchkremer und E. Minneker, 1989).

Fig. 3 Abstinence profiles of smokers during nine-week smoking cessation treatment combining transdermal nicotine or placebo with behavioral treatment, and subsequent abstincence profile during one year without treatment (G. Buchkremer and E. Minneker, 1989).

kelt ist. So ist insbesondere noch keine wirksame Permeationsbarriere etabliert, die an die vollständige Ausbildung des Stratum corneum gebunden ist. Es gelingt daher leicht, Frühgeborenen mit Hilfe von theophyllinhaltigen Hydrogelen über Tage hinweg gleichmässig Wirkstoff zuzuführen (N. Evans und N. Rutter, 1989), um damit toxische Konzentrationsspitzen zu vermeiden (Bild 4).

4.4 Estradiol-Pflaster

Der Abfall der Estradiol-Spiegel nach Eintritt der Menopause ist eine der Ursachen für den über Jahre verteilten schleichenden Calcium-Verlust der Knochensubstanz (Osteoporose) bei dazu disponierten Frauen. Substitution von körpereigenem Estradiol durch von aussen zugeführtes Estradiol könnte dieses Defizit im Prinzip ausgleichen und somit prophylaktisch wirken. Mit transdermal zugeführtem Estradiol gelingt es, die Estradiol-Spiegel etwa auf dem Niveau vor der Menopause zu halten. Es muss sich aber noch zeigen, ob dieses erst vor kurzem am Markt eingeführte Produkt auch langfristig sein Ziel erreichen kann, dem Calcium-Verlust vorzubeugen.

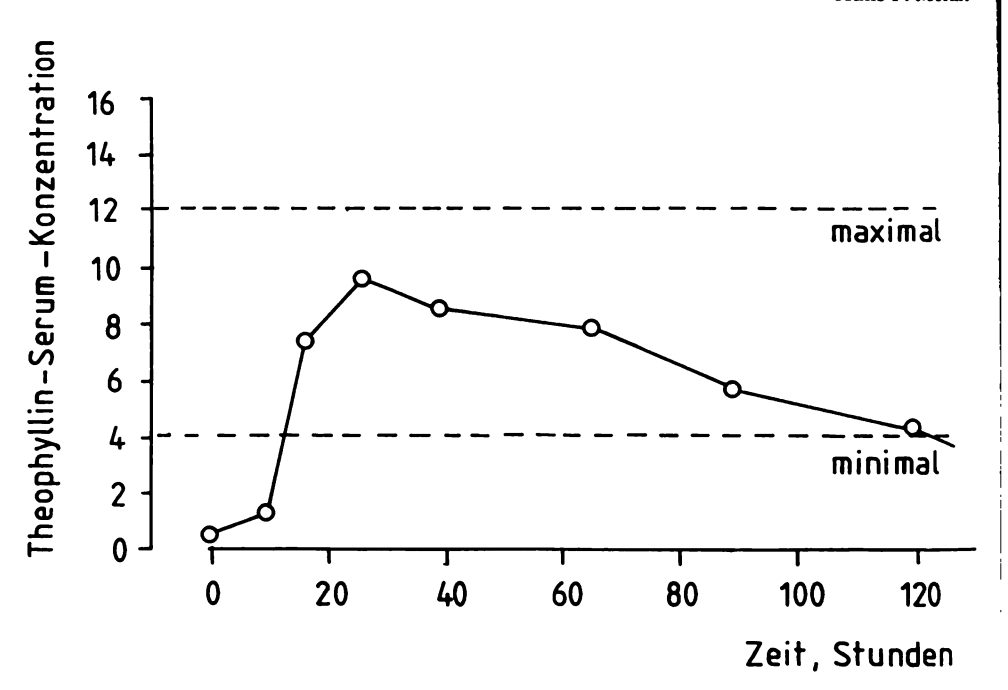


Bild 4 Transdermale Theophyllin-Zufuhr bei Frühgeburten nach N. Evans und N. Rutter (1989).

Fig. 4 Transdermal theophyllin delivery to newborn immature infants (N. Evans and N. Rutter, 1989).

5 Zur Steuerung der Arzneistoffabgabe aus transdermalen Systemen

Die nicht nur an transdermale Systeme, sondern auch an andere sog. therapeutische Systeme gestellte Forderung ist, Arzneistoffe über längere Zeitspannen mit einigermassen reproduzierbarer Kinetik an den Körper abzugeben. Dieses Ziel ist nicht nur eine Angelegenheit der Fähigkeit zur Freigabe, sondern auch der Fähigkeit des Organismus, bestimmte Mengen an Arzneistoff in einer angemessenen Zeit aufzunehmen. Nur dann kann die Arzneistoffaufnahme durch die Kinetik der Abgabe aus der Arzneiform bestimmt werden. So kann mit einer schnell freisetzenden Arzneiform nur dann ein schnelles Ansteigen des Blutspiegels erreicht werden, wenn eine geeignete Aufnahmegeschwindigkeit bereitsteht, während bei einer langsamen Freisetzung eher die Möglichkeit besteht, dass das, was an Arzneistoff abgegeben wird, auch sofort aufgenommen wird.

Man kann sich dies auch mit dem Bild des «Flaschenhalses» erklären, der :m in der Wissenschaft üblichen Terminus des «geschwindigkeitsbestimmenden Schritts» entspricht: Bei rascher Arzneistoffabgabe kann die Aufnah-

me des Arzneistoffs den Flaschenhals bilden, ist die Abgabegeschwindigkeit aber langsam genug, bildet sie selbst den Flaschenhals, vorausgesetzt die Aufnahme in den Körper verläuft relativ rasch. Dies wäre eine bevorzugte Eigenschaft von Freigabesystemen, denn die Aufnahme des Arzneistoffs wäre von seiner Abgabe aus der Arzneiform bestimmt und nicht von zeitlich und individuell schwankenden physiologischen Bedingungen. Ausserdem würde wirkungsvoll verhindert, dass die im Freigabesystem vorrätige Menge an Arzneistoff, die mehreren Einzeldosen entspricht, den Organismus in toxischer Weise auf einmal überflutet, ein wichtiger Aspekt der Arzneimittelsicherheit.

5.1 Systemsteuerung versus Hautsteuerung

Aus Überlegungen über den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt (Merkle, 1989) leitet sich eine Nomenklatur ab, nach der von *Hautsteuerung* gesprochen wird, wenn nicht die Abgabe aus der Arzneiform, sondern die Aufnahme in den Organismus, d.h. der Durchgang durch die Haut, die Gesamtkinetik steuert. Im Gegensatz dazu meint man *Systemsteuerung*, wenn nicht die Haut, sondern die Abgabe aus der Arzneiform, dem System, den Prozess kontrolliert.

Betrachtet man das wahre Verhalten, z.B. an Hand von Bild 5, so fällt auf, dass solche Begriffe zwar einiges an richtiger Information enthalten, dass sie aber den wahren Vorgang höchstens vereinfachend charakterisieren. In Wahrheit ist der Prozess der Auflösung, Diffusion und Verteilung eines Arzneistoffs aus einer Arzneiform in die Haut, mit der anschliessenden Permeation durch das Stratum corneum, der darauf folgenden Verteilung in die Dermis, der Metabolisierung, der möglichen Bindung an ein Depot und der Aufnah-

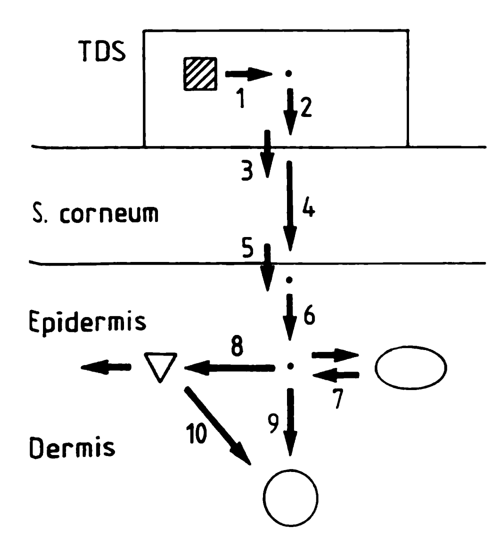


Bild 5 Ablauf der Zufuhr eines Arzneistoffs aus einem transdermalen System (TDS) in die Haut, unter Beteiligung von Arzneistoffauflösung (1), Diffusion (2, 4, 6), Verteilung (3, 5), Depotbildung (7), Metabolismus (8) und Aufnahme in das Kapillarsystem (9, 10).

Fig. 5 Sequence of events in the course of drug delivery from transdermal system (TDS) into the skin; participation of drug dissolution (1), diffusion (2, 4, 6), partitioning (3, 5), depot formation (7), metabolism (8) and uptake into capillary vasculature (9, 10).

me in die Kapillaren des Blutkreislaufs viel komplexer, als es die Begriffe *Systemsteuerung* und *Hautsteuerung* zulassen. Schliesslich sind nicht nur diese beiden Extremfälle möglich, sondern auch wechselnde Beteiligungen beider Faktoren.

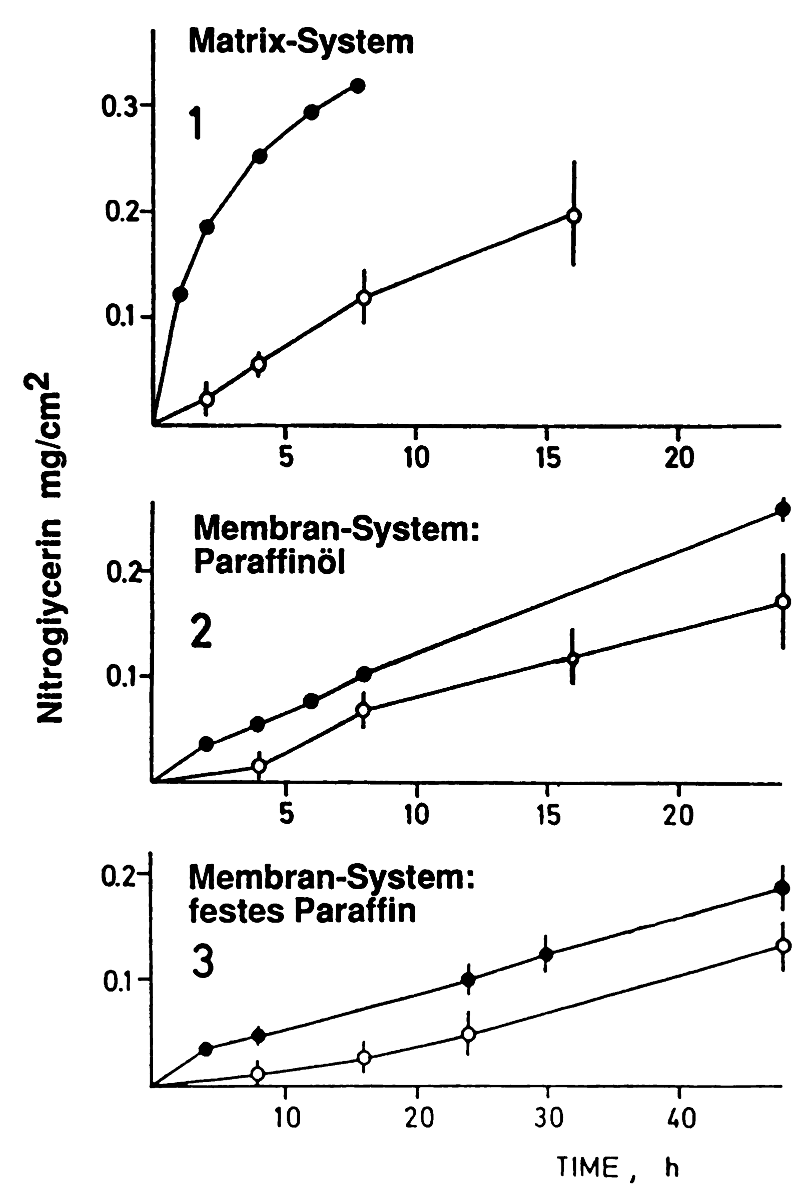
Versucht man eine physikalisch-chemische Charakterisierung dieser Prozesse, wird es darauf ankommen zu definieren, wo die entscheidenden Konzentrationsgradienten des Transportvorgangs zwischen System und Haut lokalisiert sind (G. Gienger et al., 1986; H. P. Merkle et al., 1985). Sie kennzeichnen die relevanten geschwindigkeitsbestimmenden Teilprozesse in den verschiedenen Elementen des Transportvorgangs und sind naturgemäss eine Funktion der Zeit.

5.2 Beispiel I

Ein Beispiel für die komplexe Kinetik eines transdermalen Systems wird im folgenden demonstriert (H. P. Merkle et al., 1985). Bild 6 zeigt die Wirkstofffreigabe in vitro (in einem wässrigen Medium) und in vivo (auf menschlicher Haut). Das untersuchte System wird in Bild 7 dargestellt. Bei der Wirkstofffreigabe fällt auf, dass das reine Matrix-System auffällige Unterschiede zwischen der Freigabe in vitro und in vivo zeigt. Die Freigabe auf menschlicher Haut fällt wesentlich langsamer aus als in einem wässrigen Medium. Dies ist offensichtlich der Fall einer Hautsteuerung. Ganz anders sieht es bei den beiden Fällen aus, in denen mit Membran-Systemen gearbeitet wurde. In beiden Fällen ergeben sich zwar anfängliche Unterschiede zwischen der Freigabe in vitro und in vivo, dennoch erreichen die Freigabegeschwindigkeiten in etwa die gleichen Werte, was an den etwa gleich grossen Steigungen deutlich wird. Die Schlussfolgerung aus diesem Ergebnis besteht darin, dass in beiden Membran-Systemen mehr oder weniger Systemsteuerung vorliegt.

Es liegt zunächst nahe, diese Steuerung auf den Durchgang des Arzneistoffs durch die mikroporöse Membran zurückzuführen, die das Wirkstoffdepot von der Haftschicht trennt. In der Tat läuft die Freigabe schneller ab, wenn die Poren dieser Membran mit flüssigem Paraffinöl imprägniert wurden, als wenn diese festes Paraffin enthielten. Dennoch zeigten nähere Untersuchungen, dass der Mechanismus der Freigabe weit komplexer abläuft:

Es konnte nachgewiesen werden, dass es die Aufnahme von Wasserdampf aus der Haut ist, die zu Anfang der Freigabe aus den Membran-Systemen geschwindigkeitsbestimmend ist. Flüssiges Paraffin lässt eine rasche Aufnahme von Wasserdampf aus der Haut in die Schicht des Wirkstoffdepots zu. Diese Schicht nimmt relativ rasch Feuchtigkeit auf, was zu einer ebenso raschen Erhöhung der Diffusionseigenschaften des eingesetzten Polymers für den Arzneistoff führt, ausserdem zu einer Verschiebung des Verteilungskoeffizienten des Arzneistoffs zwischen dem Wirkstoffdepot und der Haftschicht. Als Folge ergibt sich eine relativ rasche, aber systemkontrollierte Freigabe. Besteht die Imprägnierung der porösen Membran jedoch aus festem Paraffin, so verläuft



1 6 In vitro und in vivo Freigabe aus experimentellen Nitroglycerol-Systemen. In vitro: ge-te Symbole. In vivo: offene Symbole, jeweils mit Standardabweichungen. 1: Matrix-System. 2: mbran-System: Poren mit flüssigem Paraffinöl gefüllt. 3: Membran-System: Poren mit festem affin gefüllt.

6 In vitro and in vivo release from transdermal nitroglycerol delivery systems. In vitro: symbols. In vivo: open symbols; with standard deviations. 1: matrix system. 2: membrane em: pores filled with mineral oil. 3: membrane system: pores filled with solid paraffin.

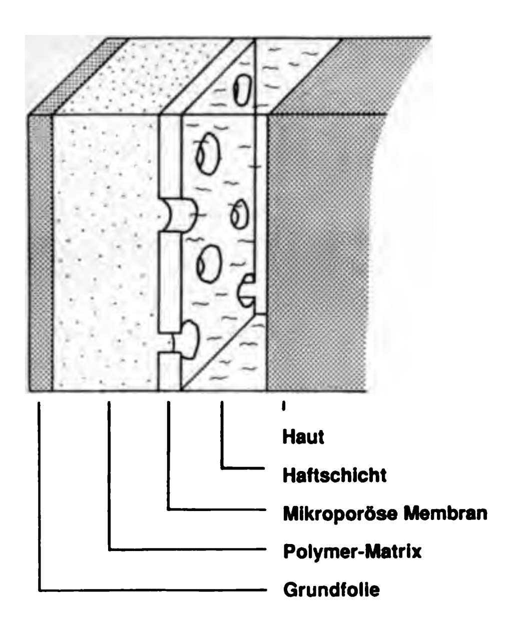


Bild 7 Experimentelles transdermales System zur Freigabe von Nitroglycerol nach H. P. Merkle et al. (1985), vgl. Text und Bild 6.

Fig. 7 Experimental transdermal delivery system (H. P. Merkle et al., 1985), see text and Fig. 6 for comments.

die Aufnahme von Feuchtigkeit weniger rasch; mit der gleichen Konsequenz führt dies zu einer langsameren Freigabe des Arzneistoffs.

Zusammenhänge derartig komplexer Natur werden am besten erhärtet, wenn die Aussagen durch unabhängige mathematische Modellierungen bestätigt werden können. Dies konnte im vorliegenden Fall erreicht werden (G. Gienger et al., 1986): Eine numerische Simulation auf der Basis der simultanen Lösung von vier Differentialgleichungen zweiter Ordnung, und zwar eine für jede Schicht des Systems, klärte den komplexen Zusammenhang auf. Die Systemsteuerung erfolgte durch den geschwindigkeitsbestimmenden Einfluss der Aufnahme von Wasserdampf durch die imprägnierten Membranen, mit der erwähnten Wirkung auf Diffusion im Wirkstoffdepot und Verteilung des Wirkstoffs zwischen Wirkstoffdepot und Haftschicht.

Ein zweites wurde durch diese Simulation klar: Die zu Anfang des Freigabeprozesses in vivo beobachtete Systemkontrolle wird im weiteren Verlauf der Freigabe in die Haut in einen hautkontrollierten Prozess überführt, dann nämlich, wenn die Konzentrationsgradienten im System sich allmählich ausgleichen und nur noch die Gradienten innerhalb der Haut bestehen und den Freigabeprozess kontrollieren.

5.3 Beispiel II

Ein mindestens ebenso komplexes Beispiel ist für ein Estradiol-System beschrieben worden (W. I. Higuchi et al., 1987): Es handelt sich um ein kommerzielles Estradiol-System, welches mit einer Membran ausgestattet ist. Das Wirkstoffreservoir ist eine ethanolhaltige Suspension von Estradiol-Kristal-

len. Die Freigabe unter In-vivo-Bedingungen wird nicht allein durch die Permeation von gelöstem Estradiol durch die Membran bestimmt, sondern auch durch die gleichzeitige Permeation von Ethanol in die Epidermis. Wie beobachtet wurde, ist Ethanol in der Lage, eine mehrfache Funktion einzugehen: Es erhöht die Affinität der Epidermis für den Wirkstoff, dämpft den in der Epidermis ablaufenden Abbau des Arzneistoffs in Form der Metabolisierung von Estradiol zu Estron und schafft möglicherweise dort auch durch einen noch nicht näher bekannten Mechanismus Poren erhöhter Permeabilität für Estradiol.

Der Prozess ist insgesamt noch komplexer als der zuvor skizzierte Vorgang und macht erneut sehr deutlich, dass Begriffe wie Systemsteuerung und Hautsteuerung die in transdermalen Systemen ablaufenden Transport-Prozesse nur unzureichend beschreiben.

6 Die Verbesserung der Absorption, ein essentielles Problem der transdermalen Therapie

Die vergleichsweise geringe Permeabilität der Haut, insbesondere des Stratum corneum, ist für viele Arzneistoffe ein entscheidendes Hindernis bei der transdermalen Anwendung. Zu seiner Überwindung bestehen eine Reihe von Strategien:

Verbesserter Durchgang durch die Haut ist zunächst vor allem dann zu erwarten, wenn die Barrierefunktion der Haut durch sog. *Absorptionsverbesserer* herabgesetzt werden kann. Dies würde allerdings einen Eingriff in den bestehenden physiologischen Zustand dieser Barriere erfordern. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Arzneistoffe chemisch so zu modifizieren, dass sie eine höhere Affinität zu Haut erhalten. Ihre therapeutische Wirkung müssen sie jedoch beibehalten. Dies wäre z. B. durch Einführung einer physiologisch abspaltbaren Gruppe möglich (*prodrug approach*), die die Affinität zum Stratum corneum verbessert. Ein dritter Weg ergibt sich aus einer Verbesserung der *thermodynamischen Aktivität* der Wirkstoffe in der Arzneiform, die notwendigerweise eine Erhöhung der Aufnahme in die Haut nach sich zieht. Ein letzte Möglichkeit besteht in der Anwendung des Prinzips der *Iontophorese*, d. h. in der Einschleusung von Arzneistoffen in die Haut in Richtung eines elektrochemischen Gradienten.

6.1 Absorptionsverbesserer

Die Strategie bei der Suche nach geeigneten Absorptionsverbesserern für den transdermalen Durchtritt von Arzneistoffen ergibt sich aus der Struktur und der Biochemie der Epidermis, insbesondere des Stratum corneum. Legt man das oben erwähnte Backstein-Mörtel-Modell zugrunde, gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten für einen Durchtritt: Dies ist zunächst der Weg durch

die Lipidmatrix, die aus Lipiden vom Typ der Ceramide mit Anteilen an Sterolen und Fettsäuren besteht und eine hoch organisierte, dichte Struktur darstellt. Weiterhin besteht der Weg, der in der Hauptsache durch die keratinreichen Corneocyten führt, die Reste der ehemaligen Keratinocyten (B.W. Barry, 1987).

Bei beiden Varianten sind Verbindungen denkbar, die durch Wechselwirkung zu einer Auflockerung der geordneten Strukturen und damit zu einer Verbesserung ihrer Durchlässigkeit führen. So können z.B. Verbindungen vom Typ der N-alkyl-azacycloheptanon-2-one sich aufgrund ihrer amphiphilen Natur gut in die Lipide des Stratum corneum einlagern, dabei ihre Struktur brechen und somit die Durchlässigkeit der Barriere verbessern. Es wurden, abhängig von der Art der Arzneistoffe, Verbesserungen um eine Grössenordnung und mehr erzielt. Ähnliches gelingt prinzipiell auch der Ölsäure, an der das einfache physikalische Prinzip ihrer Wirkung besonders einleuchtend nachzuvollziehen ist: Die Ölsäure besitzt durch die Doppelbindung in ihrem Alkylrest einen Knick, der sie in die Lage versetzt, dicht gepackte ungesättigte Lipidstrukturen durch Einlagerung aufzubrechen. Andere Stoffe, wie 1,2-Propylenglykol, lagern sich offenbar bevorzugt in die Keratin-Strukturen ein, wobei sie deren Ordnung stören. Weitere Stoffe, wie das Decylmethylsulfoxid, sind dagegen in der Lage, sich in beiderlei Strukturen zu integrieren.

Die Forschung auf diesem Gebiet ist darauf bedacht, derartige Stoffe aufzudecken, die eine möglichst wirksame Interaktion mit einer der beiden oder beiden Strukturen eingehen. Untersuchungsmethoden dabei sind etwa die Differential-Thermo-Analyse, die Mikrokalorimetrie, die Kernresonanz, die Röntgenbeugung und die Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie. Erweisen muss sich die Wirksamkeit solcher Verbindungen aber am lebenden Objekt, wobei der Einsatz von Versuchstieren nicht immer zu einem repräsentativen Ergebnis führt, da sich Aufbau und Biochemie der Epidermis verschiedener Säuger teilweise sehr wesentlich voneinander unterscheiden.

Im übrigen darf nicht vergessen werden, und dies ist wiederum eine Spezialität pharmazeutischer Forschung, dass Absorptionsverbesserer, die theoretisch und am lebenden Objekt eine noch so klare Wirkung zeigen, in der Praxis aus toxikologischen Gründen nicht unbedingt auch anwendbar sind. Im Falle von Absorptionsverbesserern muss der sehr enge Pfad zwischen einer lokal und zeitlich reversiblen Veränderung des Stratum corneum, aber daher möglicherweise schwachen Wirkung, und einer toxischen und dauerhaften Schädigung der Epidermis bei starker Wirkung beschritten werden, und dies unter dem Gesichtspunkt von Patienten von unterschiedlichem Hauttyp, Alter, Geschlecht, Hautpflege etc. Dadurch bedingt gibt es auf dem Gebiet der Absorptionsverbesserer bisher keinen klaren, allgemeinen Durchbruch. Es überwiegen, bis auf einige Verbindungen mit mässiger Wirkung, die toxikologischen Bedenken. Auch werden vermehrt Stimmen laut, die davor warnen, der Haut eine Erhöhung ihrer Durchlässigkeit zuzumuten, die die Schutzfunktion der Hautbarriere gefährdet und dem unkontrollierten Einschleusen von

toxischen Haptenen und Antigenen aus der Umwelt Vorschub leistet. Eine Überlegung, die in einer Zeit erhöhter Allergie-Tendenz sicher nicht grundsätzlich verkehrt ist.

6.2 Thermodynamische Erwägungen

Eine Strategie mit geringerem Risiko ist die Überlegung, die Zufuhr an Arzneistoff in die Haut dadurch zu verbessern, dass ihr «mehr» davon angeboten wird. Solange der Arzneistoff in gelöster Form vorliegt, erhöht sich proportional zur Konzentration auch die Geschwindigkeit seines Übergangs in die Haut. Wird jedoch die Löslichkeitsgrenze überschritten, führt jede weitere Erhöhung der Gesamtkonzentration zu keiner Steigerung der Arzneistoffaufnahme, da zwar die Menge an Arzneistoff zunimmt, nicht aber seine Konzentration in gelöster Form.

Die Obergrenze der Löslichkeit kann jedoch durchbrochen werden, wenn es gelingt, an Arzneistoff übersättigte Systeme herzustellen. In solchen Systemen liegt die Konzentration des Arzneistoffs zwar über der Sättigungsgrenze, nur kommt es zu keiner spontanen Ausfällung des überschüssigen Anteils. Gerade in polymeren Trägern sollte es möglich sein, metastabile Systeme zu konzipieren, da Polymere als Kristallisationsverzögerer bekannt sind. Die Anwendung dieser Systeme würde allerdings eine hohe Lagerstabilität der übersättigten Zustände in der Arzneiform bedingen. Darüber bestehen noch kaum Erfahrungen.

Es muss jedoch nicht immer eine Erhöhung der Konzentration sein, mit der eine Verbesserung des transdermalen Durchgangs erreicht werden kann. Entscheidend ist nämlich die Erhöhung der thermodynamischen Aktivität des eingebetteten Arzneistoffs. Dieser ist um so mehr zum Eintritt in die Haut bereit, je grösser seine thermodynamische Aktivität ist. Durch Wechselwirkungen mit dem Polymeren oder anderen Bestandteilen des transdermalen Systems wird seine Aktivität jedoch vermindert. Daraus ergibt sich die Strategie, ein Trägerpolymer zu finden, welches nur vernachlässigbare Wechselwirkungen mit dem betreffenden Arzneistoff eingeht (R. Lichtenberger et al., 1988). Auf diese Weise liesse sich die thermodynamische Aktivität in Verbindung mit der Stabilisierung hochübersättigter Zustände stark verbessern.

Für dieses Ziel gibt es eine Reihe interessanter Konzepte: Einmal könnten Polymere eingesetzt werden, deren chemische Natur auf einen bestimmten Arzneistoff zugeschnitten wäre, und zwar so, dass möglichst wenig Wechselwirkungen zustande kommen. Allerdings ist die Palette toxikologisch zugelassener Polymere so eng, dass dies gegenwärtig nicht immer durchführbar wäre. Alternativ aber könnten zugelassene Polymere auch zusätzlich chemisch vernetzt werden, was ihre Interaktionsmöglichkeiten mit dem Arzneistoff aus räumlichen Gründen einschränkt. Auch ein solcher Vorgang kann die Freisetzung in die Haut verbessern (R. Lichtenberger et al., 1988).

Interessant ist auch ein Vorschlag, Mikroemulsionen der Arzneistoffe für

diesen Zweck einzusetzen. Solche «Emulsionen» sind im Unterschied zu wahren Emulsionen thermodynamisch stabil, halten den Arzneistoff somit durch intermolekulare Assoziation ihrer Bestandteile wirkungsvoll und stabil fest. Unter solchen Bedingungen ist die thermodynamische Aktivität von Wirkstoffen allerdings denkbar gering. Neigt nun aber ein Bestandteil der Mikroemulsion seinerseits dazu, in die Haut einzudringen, z. B. weil er eine erhebliche Affinität zu einem der Bestandteile der Haut besitzt, erhöht sich die freie Gibbs'sche Energie des Systems und damit die thermodynamische Aktivität des Arzneistoffs im Träger, was wiederum den Transport in die Haut vorantreibt.

Damit verwandt sind auch Überlegungen, transdermale Arzneiformen mit einem Additiv zu versehen, welches den Arzneistoff zwar gut löst, aber sehr leicht in die Haut einzudringen vermag. Stabilisiert dieses Additiv den Arzneistoff also zunächst in der Arzneiform, so sorgt es nach seinem Übertritt in die Haut dafür, dass der Arzneistoff, dem nun geänderten thermodynamischen Gradienten entsprechend, in die Haut einzuwandern beginnt. Das in einem kommerziellen Estradiol-Pflaster enthaltene Ethanol hat diesen Schlepper-Effekt (W. I. Higuchi et al., 1987).

6.3 Iontophorese

Furore haben in den letzten Jahren Überlegungen gemacht, die Prinzipien der Iontophorese für die Zufuhr von Arzneistoffen zu nutzen (A. K. Banga und Y. W. Chien, 1988). Diese Technik wird besonders für solche Arzneistoffe propagiert, für die es unter normalen Umständen überhaupt kein nennenswertes Eindringen in die Haut gibt. Dies gilt vor allem für Peptid-Arzneistoffe, deren Hautpermeabilität aufgrund ihrer Molekülgrösse, ihrer Hydrophilie und ihrer geladenen Gruppen äusserst gering ist. Zwar ist die Iontophorese keine Neuentdeckung. Es ist seit langem bekannt, dass sich geladene Moleküle unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes zwischen zwei flach auf der Haut aufliegenden Elektroden in die Haut einschleusen lassen (Bild 8). Eine Anwendung dieser Technik erforderte jedoch umfangreiche Installationen, die für ihren Einsatz mindestens eine ärztliche Praxis erforderten. Verbrennungen durch falsche Handhabung waren nicht ausgeschlossen. Durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikroelektronik und durch miniaturisierte Batterien lässt sich der technische Aufwand heute aber auf die Grösse einer Armbanduhr reduzieren und macht die direkte Anwendung durch den Patienten denkbar.

Besonders attraktiv ist die Aussicht, auf diese Weise Arzneistoff zu programmierbaren Zeiten in die Haut einzuschleusen, welche den Forderungen nach einer optimalen Dosierungsfrequenz entsprechen und die natürlichen physiologischen Zyklen respektieren. Reizvoll ist auch die Aussicht, Arzneistoff auf Bedarf zuzuführen, d.h. eine Therapie nach Belieben abzubrechen und zu aktivieren, soweit dies das Therapieziel fordert und es die Trägheit der

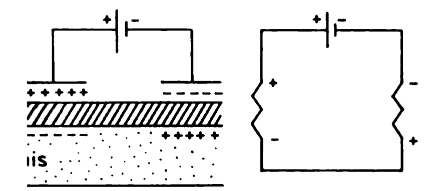


Bild 8 Prinzip der transdermalen Iontophorese: Durch flach auf der Haut aufliegende Elektroden wird über dem Stratum corneum (SC) ein elektrisches Feld erzeugt, welches in der Lage ist, geladene Arzneistoffe in die Haut zu schleusen. Der geschlossene Stromkreislauf (rechts) wird durch Ladungsträger in den Zellen des belebten Teils der Epidermis hergestellt. Der Hauptwiderstand liegt über dem Stratum corneum.

Fig. 8 Principle of transdermal iontophoresis: electrodes attached to the skin establish electric field across stratum corneum for delivery of ionic drug molecules into the skin. The electrical circuit (right side) is closed by charged molecules in the viable part of the epidermis.

als Aufnahmeorgan für Arzneistoffe zulässt. Fraglich ist allerdings, in-
eit derartige revolutionäre Arzneiformen mitsamt ihrem intellektuellen
ruch von der Mehrheit der Patienten akzeptiert werden können, ganz zu
eigen von ihren Kosten. Im übrigen stellt sich wie bei den Absorptions-
sserern die Frage, welche Risiken mit einem derartigen Verfahren ver-
en sind und ob nicht auf diese Weise auch unerwünschte Verbindungen,
Haptene und Antigene, in die Haut eingeschleust werden. Auch ist die
nerationsfähigkeit der Haut auf derartige Stresszustände noch nicht ge-
nd bekannt.

hlussfolgerungen

:ur Zeit bestehenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und die
egungen über den therapeutischen Nutzen von transdermalen Systemen
n ihrer Gesamtheit eine Demonstration der Komplexität pharmazeuti-
Forschung. Sie zeigen nicht nur die frappierenden Möglichkeiten sol-
Arzneiformen, sondern illustrieren auch die engen Grenzen, die dem teil-
unerschöpflichen Reichtum an naturwissenschaftlichen Ideen zu die-
Thema gesteckt sind. So gilt hier besonders, dass nicht alles, was tech-
machbar erscheint, wenn der wissenschaftlichen Phantasie freier Lauf
sen wird, auch den Forderungen nach wirksamen und sicheren Arznei-
ln entspricht. Dies macht Innovation auf dem Gebiet der Arzneiformung
hwierig, auf jeden Fall mühsamer, als dies in manchen Publikationen
Ausdruck kommt. Entsprechend verwundert es nicht, dass die anfängli-
Euphorie für transdermale Systeme einer nüchternen Betrachtung gewi-
ist. Diese gilt es beizubehalten, wenn das attraktive Potential dieser Arz-
rmen genutzt werden soll.

8 Literatur

Banga A.K., Chien Y.W. (1988) Iontophoretic delivery of drugs: Fundamentals, developments and biomedical applications, J. Control. Rel. 7, 1.

Baker R.W., Heller G. (1989) Materials selection for transdermal delivery systems, in: Transdermal drug delivery, Hadgraft J., Guy R.H. (Eds.), M. Dekker, New York – Basel, p. 293.

Barry B.W. (1987) Mode of action of penetration enhancers in human skin, in: Advances in drug delivery systems, Vol. 3, Anderson J.M., Sung Wan Kim (Eds.), Elsevier, Amsterdam, p. 85.

Bissett D.L. (1987) Anatomy and biochemistry of skin, in: Transdermal delivery of drugs, Vol. I, Kydonieus A.F., Berner B. (Eds.), CRC Press, Boca Raton, FL, p. 29.

Buchkremer G., Minneker E. (1989) Efficiency of multimodal smoking cessation therapy combining transdermal nicotine substitution with behavioral therapy, Meth. and Find. Exp. Clin. Pharmacol. *11*, 215.

Chien Y.W. (Ed.) (1987) Transdermal controlled systemic medications, Marcel Dekker, New York.

Chong S., Fung H.-L. (1989) Transdermal drug delivery systems: pharmakokinetics, clinical efficacy and tolerance development, in: Transdermal drug delivery, Hadgraft J., Guy R.H. (Eds.), Marcel Dekker, New York – Basel, p. 135.

Evans N., Rutter N. (1989) Transdermal drug delivery to the newborn infant, in: Transdermal drug delivery, Hadgraft J., Guy R.H. (Eds.), M. Dekker, New York – Basel, p. 155.

Gienger G., Knoch A., Merkle H.P. (1986) Modeling and numerical computation of drug transport in laminates: Model case evaluation of transdermal delivery, J. Pharm. Sci. *75*, 9.

Hadgraft J., Guy R.H. (Eds.) (1989) Transdermal drug delivery, Marcel Dekker, New York – Basel.

Higuchi W.I., Rohr U.D., Burton S.A., Liu P., Fox J.L., Ghanem A.H., Mahmoud H., Borsadia S., Good W.R. (1987) Effects of ethanol on the transport of β-estradiol in hairless mouse skin: Comparison of experimental data with a new theoretical model, in: Controlled-release technology, pharmaceutical applications, Lee P.I., Good W.R. (Eds.), ACS Symposium Series No. 348, ACS, Washington, p. 232.

Lichtenberger R., Wendel K., Merkle H.P. (1988) Polymer films form aqueous polymer dispersions as carriers for transdermal delivery of lipophilic drugs, Abstract No. 89, Program 15th International symposium, CRS, Basel, p. 86.

Lynch D.H., Roberts L.K., Daynes R.A. (1987) Skin immunology: The Achilles heel to transdermal drug delivery, in: Advances in drug delivery systems, Vol.3, Anderson J.M., Sung Wan Kim (Eds.), Elsevier, Amsterdam, p. 39.

Merkle H.P. (1989) Transdermal delivery systems, Meth. and Find. Exp. Clin. Pharmacol. *11*, 135.

Merkle H.P., Knoch A., Gienger G. (1985) Release kinetics of polymeric laminates for transdermal delivery: Experimental evaluation and physical modelling, J. Control. Rel. *2*, 99.

Musolf M.C. (1987) Pressure-sensitive adhesives: Science and engineering, in: Transdermal controlled systemic medications, Chien Y.W. (Ed.), Marcel Dekker, New York – Basel, p. 93.

Perlmutter G.S., Paran E., Falkner B., Bies C.M., Fagan T., Chase R.R., Lowenthal D.T. (1987) in: Transdermal controlled systemic medications, Chien Y.W. (Ed.), Marcel Dekker, New York – Basel, p. 321.

Wolff H.-M., Hoffmann H.R., Cordes G. (1987) Development of processes and technology for adhesive-type transdermal therapeutic systems, in: Transdermal controlled systemic medications, Chien Y.W. (Ed.), Marcel Dekker, New York – Basel, p. 365.

Prof. Dr. Hans P. Merkle, Departement Pharmazie, Galenische Pharmazie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Vorträge der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich Wintersemester 1989/90

30. Oktober 1989
Prof. Dr. *John G. Ramsay*, Geologisches Institut der ETHZ
Die Entwicklung des Himalaja als Folge der Kollision Indien–Asien
Vor etwa 150 Millionen Jahren war die Indische Halbinsel, gemeinsam mit Afrika und der Antarktis, Teil des südlichen Gondwana-Kontinents. Als Folge von Konvektionsströmungen im Mantel bewegte sich Indien auf Asien zu, wobei die ozeanische Kruste zwischen den beiden Kontinenten unter Asien subduziert wurde. Grosse vulkanische Inselbögen, vergleichbar mit den heutigen Inselbögen Japans und Malaysias, bildeten sich entlang des asiatischen Kontinentalrandes. Vor 60 Millionen Jahren kollidierte Indien mit diesen Vulkanbögen und anschliessend mit der asiatischen Kontinentalkruste. Diese letztere Kollision führte durch extreme Gesteinsformation mit Faltungen, Überschiebungen und Hebungen zur Bildung der Himalaja-Kette. Es wird im Vortrag diskutiert werden, wie Geologen und Geophysiker die Geschichte dieses Gebirgszuges rekonstruiert haben.

13. November 1989
Prof. Dr. *Rolf Grauer*, Paul-Scherrer-Institut, Villigen
Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: Chemische Aspekte
Die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktiven Abfall basiert auf einem gestaffelten System von technischen und natürlichen Barrieren. Die Abfälle aus der Aufarbeitung der Brennelemente werden in Glas fixiert und in Stahlbehälter mit einer Wanddicke von 25 cm eingeschweisst. Die Lagerstollen werden mit quellfähigem Bentonit-Ton verfüllt. Diese etwa meterstarke Verfüllung stellt wegen ihrer geringen Wasserdurchlässigkeit und der guten Sorptionseigenschaften eine effiziente Transportbarriere dar, die nur von sehr langlebigen Nukliden überwunden werden kann. Einige davon sind im Grundwasser schwer löslich, die meisten werden auf ihrem Weg durch das Wirtgestein und die darüberliegenden Sedimentschichten durch Absorption und alle durch Matrixdiffusion verzögert.

Sicherheitsanalysen haben nachgewiesen, dass die aus der Nuklidfreisetzung aus einem Endlager resultierende Strahlenexposition das behördlich festgelegte Schutzziel nicht überschreitet. Zur Absicherung solcher Analysen ist es notwendig, das Langzeitverhalten der technischen Barrieren und den Chemismus der Radionuklide auf dem potentiellen Migrationspfad zu kennen. Dabei genügt eine phänomenologische Beschreibung nicht; erforderlich ist das Verständnis der relevanten Reaktionsmechanismen.

27. November 1989
Podiumsgespräch und Diskussion
Müll: Die Abfallwirtschaft im Spannungsfeld Versorgung–Entsorgung
Referentin und Referenten:
Dr. *Joan Davis*, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Dübendorf
Dr. *Paul Brunner*, EAWAG, Dübendorf
Dr. *Hans-Peter Fahrni*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
Dr. *Erich Suter*, Kehrichtverwertung, Zürcher Oberland (KEZO), Hinwil
Gesprächsleitung: Dr. *Peter Perrer*, EAWAG, Dübendorf
Moderne Dienstleistungsgesellschaften wie die Schweiz sind geprägt durch einen hohen Stoffumsatz. Die Abfallwirtschaft hat zum Ziel, diese Stoffe umweltverträglich zu entsorgen. Durch die hohe Versorgungsrate wird die Entsorgung dauernd mit mehr und neuen Abfällen konfrontiert. Es stellt sich die Frage, inwiefern eine Strategie der Vermeidung und Verminderung von Abfällen die Abfallwirtschaft entlasten kann.

11. Dezember 1989
PD Dr. *Anna Wirz-Justice*, Psychiatrische Universitätsklinik, Basel
Licht und Depression
Licht vermag die endogenen circadianen Rhythmen bei Mensch und Tier auf den 24stündigen Tag-Nacht-Wechsel zu synchronisieren. Saisonale Rhythmen bei Tieren (z.B. Winterschlaf, Re-

produktion, Migration) werden durch die Tageslänge (Photoperiode) gesteuert. Gewisse Depressionen zeigen eine eindrückliche Periodizität des Auftretens im Herbst/Winter und können durch helles Licht behandelt werden. Licht eröffnet neue Möglichkeiten der Beeinflussung circadianer Rhythmen beim Menschen (z. B. Schichtarbeit, «jet lag», gewisse Schlafstörungen).

8. Januar 1990
Dr. *Heinz Furrer*, Paläontologisches Institut der Universität Zürich
Dinosaurier der Schweiz
In den letzten 15 Jahren wurden in der Schweiz mehrere spektakuläre Dinosaurierfunde gemacht. Auf steilgestellten Felsplatten der Obertrias im Wallis und im Engadin fanden sich viele versteinerte Fussabdrücke und Fährten dieser grossen landbewohnenden Reptilien. In etwa gleichaltrigen Schichten der Nordschweiz wurden Knochen und Zähne, aber auch zusammenhängende Skelette von prosauropoden Dinosauriern ausgegraben. Längst bekannte Skelettreste und neu entdeckte Fährten von Sauropoden in Malmkalken des Juragebirges belegen auch das Vorkommen dieser grössten Dinosauriergruppe in der Schweiz.

22. Januar 1990
Prof. Dr. *Melitta Schachner*, Labor für Zellbiologie der ETH Zürich
Das Mit- und Gegeneinander von Nervenzellen
Zell-Zell-Interaktionen spielen während der Entwicklung des Nervensystems eine wichtige Rolle bei der Ausbildung neuronaler Netzwerke. Wichtig hierfür sind Erkennungsmechanismen, die durch Zelloberflächenkontakte vermittelt werden. Es sollen Untersuchungen beschrieben werden, die zeigen, dass Zellerkennung einerseits zur Stabilisierung von Zellkontakten, andererseits aber auch zur Destabilisierung führen kann. Das Zusammenspiel der beiden gegensätzlichen Phänomene könnte für die Regeneration von Nervenzellen und die Regulation der synaptischen Aktivität ausschlaggebend sein.

5. Februar 1990
Prof. Dr. *Gerhard Börner*, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Garching bei München
Die grossräumige Verteilung der Galaxien
Da inzwischen von vielen Galaxien sowohl die Position am Himmel als auch die Rotverschiebung gemessen worden sind, kann man sich ein Bild von ihrer räumlichen Verteilung machen. Es zeigt sich eine schaumartige Struktur mit grossen, blasenförmigen, leeren Gebieten und einer dichten Ansammlung von Galaxien auf den Wänden der Blasen. Daneben findet man langausgedehnte filamentartige Strukturen.

Die Entstehung derartiger Gebilde ist noch nicht völlig verstanden. Eine im Augenblick aktuelle Vorstellung ist das «Pfannkuchenmodel», bei dem zuerst grosse, flache Gebilde durch Kollaps auf eine Ebene und dann durch Fragmentierung einzelne Galaxien entstehen. Dieses und einige weitere Modelle zur Galaxienbildung werden im Vortrag geschildert.

19. Februar 1990
Podiumsgespräch und Diskussion
Schweizerische Forschungspolitik: Leitlinien und Realisierung
Referentinnen und Referenten:
Eva Segmüller, Nationalrätin, St. Gallen
Dr. *Lilian Uchtenhagen-Brunner*, Nationalrätin, Zürich
Prof. Dr. *A. Aeschlimann*, Universität Neuchâtel
Ernst Mühlemann, Nationalrat, Ermatingen
Ernst Rüesch, Ständerat, St. Gallen
Gesprächsleitung: PD Dr. *Paul Hoyningen-Hüne*, Abteilung für Geistes- und Sozialwissenschaften der ETHZ
Vertreterinnen und Vertreter der Politik und der Wissenschaft werden zur naturwissenschaftlichen Forschung in der Schweiz Stellung nehmen:

1. Leitlinien: Welches sind die Grundsätze unserer Forschungspolitik? Soll die Forschung mehr bedürfnisorientiert sein, oder soll vorrangig einfach erstklassige Forschung unterstützt werden? Welche Schwerpunkte sollen und können gebildet werden?

2. Realisierung: Wie sieht unsere Forschungspolitik in der Praxis aus? Wie steht es um die Aufgabenteilung und Koordination zwischen Bund, Kantonen und Industrien? Was tun wir für unsere Nachwuchsförderung?

ılog

mann

ıil 1990 ist Professor Dr. Fritz Gassmann, der Begründer des Instituts für Geophysik der ch, im Alter von 90 Jahren gestorben.
Gassmann wurde am 27. Juli 1899 in Zürich geboren. Seine Studien absolvierte er als iker an der ETH Zürich. 1928 habilitierte er sich für das Gebiet der Geophysik an der für Mathematik und Physik der ETH. Die Geophysik war damals noch eine sehr junge, annte Wissenschaft. Dass er sich der Geophysik zuwandte, zeigte sein weit über die ik hinausgehendes Interesse, welches er den Naturwissenschaften im allgemeinen ent-hte und dem man als sein Mitarbeiter in vielerlei Form immer wieder begegnete. Zwei Assistent für Technische Mechanik bei Professor E. Meissner und insbesondere seine ssistent des Erdbebendienstes an der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 'essor A. de Quervain waren entscheidend für seine Hinwendung zur Geophysik, zeig-ı doch sehr klar, welch unabsehbar grosses Forschungsgebiet sich vor allem in der Seis-iner ordnenden, vertieften mathematischen Betrachtung darbot.
sonders fähiger Lehrer wirkte Fritz Gassmann von 1928 bis 1942 mit Erfolg als Haupt-Mathematik und von 1937 bis 1942 als Rektor an der Kantonsschule Aarau. In diese ı auch seine Studien in Geophysik in Freiburg im Breisgau, in Jena und in Neapel. Ins-mit dem ideenreichen Professor J. Koenigsberger in Freiburg blieb Fritz Gassmann in ıntakt: er erhielt durch ihn zahlreiche Anregungen und Unterstützung bei der Beschaf-ıotwendigen Instrumente.
nge Forschungszweig Geophysik an der ETH entwickelte sich zunächst nur sehr lang-gründete Fritz Gassmann in seiner Funktion als Privatdozent das Institut für Geophy-ETH. Wie er selbst erzählte, war es zunächst im wesentlichen ein Einmannbetrieb: Ge-Feldarbeiten, Assistentin und Sekretärin war in diesen Jahren seine Frau.
der Ernennung zum ausserordentlichen Professor für Geophysik und der offiziellen ; des Instituts für Geophysik im Jahre 1942 konnte sich Fritz Gassmann voll seiner wis-ichen Tätigkeit und der Leitung und Entwicklung des Instituts widmen. 1952 wurde er ıtlichen Professor für Geophysik gewählt. In seinen zahlreichen wissenschaftlichen Ar-asste er sich mit Problemen der angewandten Seismik, mit der Ausbreitung elastischer /or allem in porösen Medien –, mit Seismographen und Schwingungsmesstechnik, fer-'avimetrie, mit dem Schwerefeld der Erde, mit Geomagnetik und Geoelektrik. Die unter :ung durchgeführten Diplomarbeiten und Dissertationen behandelten Probleme aus al-Gebieten. Durch den Anschluss des Schweizerischen Erdbebendienstes an das Institut ıysik im Jahr 1957 vergrösserte sich der Aufgabenbereich beträchtlich.

Fritz Gassmann wirkte in verschiedenen internationalen und schweizerischen wissenschaftlichen Kommissionen mit. So war er während mehr als zweier Jahrzehnte Mitglied der Eidgenössischen Meteorologischen Kommission, der Schweizerischen Geodätischen Kommission und der Schweizerischen Geotechnischen Kommission. 1952 und 1962 verbrachte er jeweils ein Semester als Gastprofessor an der Purdue University in Lafayette, Indiana, und an der University of Illinois in Urbana (USA).

Nach 41jähriger Tätigkeit als Dozent an der ETH trat Fritz Gassmann auf Ende des Sommersemesters 1969 in den wohlverdienten Ruhestand. Die Geophysik war inzwischen zu einem Grundpfeiler der erdwissenschaftlichen Ausbildung an der ETH geworden. Es ist das bleibende Verdienst Fritz Gassmanns, die Geophysik in Zürich begründet und ihr zu dem ihr zukommenden Platz innerhalb der Erdwissenschaften verholfen zu haben. Seine ehemaligen Schüler, Kollegen und Mitarbeiter werden ihm ein ehrendes Andenken bewahren. Nazario Pavoni

Laudatio

für Dr. Erich Suter
Ehrenmitglied der NGZ

Als Präsident des Zweckverbandes Kehrichtverwertung Zürcher Oberland hat Erich Suter schnell erkannt, wie die Grundhaltung «aus den Augen, aus dem Sinn» bei der Abfallentsorgung in eine Sackgasse führt. Die ständig anwachsende Abfallawine kann nicht mehr ohne unverantwortliche Schädigung der Natur, nur durch technische Systeme bewältigt werden. Für den Denker und Pragmatiker Erich Suter hiess der vernünftige Weg zur Vermeidung eines Zusammenbruchs der Entsorgung: Ursachenbekämpfung. Es sei mit dem Denken und Handeln nicht erst nach dem Entstehen des Abfallberges einzusetzen, sondern es ist auf die Entstehungsmechanismen Einfluss zu nehmen.

Erich Suter hat das Verdienst, einfache Grundsätze der Ursachenbekämpfung bei der Lösung der Abfallprobleme in das weite Bewusstsein der Bevölkerung gebracht zu haben:
- Abfälle vermeiden
- Abfälle trennen und nach Möglichkeit wiederverwerten
- Kostenerhebung nach dem Verursacherprinzip.

In unzähligen Vorträgen präsentierte Erich Suter seine inzwischen ziemlich matt gewordene Folie der Abfallawine, die er mit dem Rheinfall verglich. Mit Akribie plädierte er für den Einsatz «oben am Rheinfall», dort wo der Strom noch umgelenkt werden kann. Mit seinem erfolgreichen «Hinwiler-Versuch» konnte er zeigen, dass die Bevölkerung bereit ist, seinen Ideen zu folgen. Inzwischen ist in der ganzen Region der Kehrichtverwertung Zürcher Oberland keine weitere Zunahme der Abfälle aus den Haushaltungen mehr zu verzeichnen.

Die trotzdem immer noch zunehmende Kehrichtmenge führt Erich Suter richtig auf den ungleich stärker zunehmenden Anteil des Bauschuttes und die häufig noch ungelöste Entsorgung von Industrie und Gewerbe zurück. Konsequenterweise verlagerte er seinen Einsatz auf den Bauschutt und die autonome Entsorgung von Industrie und Gewerbe. Erich Suter wirkt wiederum als Vorkämpfer für die Trennung und Wiederverwertung von Bauschutt und die Verfeuerung von Abbruchholz in den Zementwerken und für die Idee, dass die Entsorgung von Industrie und Gewerbe nicht dem Staate aufgeladen werden darf.

Die Naturforschende Gesellschaft in Zürich spricht dem Nichtnaturwissenschaftler Erich Suter für seinen weitreichenden Blick bei der Abfallbewirtschaftung durch die Ehrenmitgliedschaft ihre grosse Anerkennung aus.

Buchbesprechung

Axel Bauer, Die Krankheitslehre auf dem Weg zur naturwissenschaftlichen Morphologie. Pathologie auf den Versammlungen Deutscher Naturforscher und Ärzte von 1822–1872. – Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1989. 293 S. (Schriftenreihe zur Geschichte der Versammlungen Deutscher Naturforscher und Ärzte, Band 5.) DM 82.–. ISBN 3-8047-0930-3.

Das Medizinhistorische Institut der Universität Heidelberg befasst sich seit den siebziger Jahren, angeregt durch die 150-Jahr-Feier der «Deutschen Gesellschaft der Naturforscher und Ärzte» (GDNÄ) und der Gründung eines Archives im Jahre 1972, mit der Geschichte dieser bedeutenden wissenschaftlichen Vereinigung. Die Früchte dieser Bemühungen sind in der «Schriftenreihe zur Geschichte der GDNÄ», herausgegeben von Dietrich von Engelhardt und Heinrich Schipperges, niedergelegt. Die vorliegende Arbeit des Medizinhistorikers Axel Bauer, 1986 als Habilitationsschrift verfasst, erschien als bisher letzte Veröffentlichung der inzwischen auf fünf stattliche Bände angewachsenen Reihe. Der Autor untersucht darin die Entwicklung der wissenschaftlichen Krankheitslehre (Pathologie), wie sie sich in den Versammlungen der GDNÄ von 1822–1872 darstellt. Der gewählte zeitliche Rahmen wird abgesteckt durch die Gründung der GDNÄ 1822 und der, im Vergleich zu andern Spezialfächern, spät erfolgten Gründung einer eigenen Sektion für Pathologische Anatomie und Allgemeine Pathologie im Jahre 1872. Die beiden Gründungsjahre begrenzen ein entscheidendes halbes Jahrhundert Pathologiegeschichte, findet doch darin der Wandel der Pathologie von der spekulativen naturhistorischen Krankheitslehre zur naturwissenschaftlichen Morphologie statt. Die Arbeit stützt sich, da noch keine Fachveranstaltungen für Pathologie abgehalten wurden, in erster Linie auf die Vorträge und Protokolle der «Allgemeinen Sitzungen» und der Sitzungen der «medizinischen Sektion» der GDNÄ. In der Einführung berichtet der Autor über den aktuellen Forschungsstand zur Geschichte der Pathologie im 19. Jahrhundert und gibt eine kritisch kommentierte Bibliographie zur Ideen-, Problem- und Fachgeschichte sowie zur Bio- und Ergographie bedeutender Pathologen. Der Forschungsstand zur Geschichte der Naturforscherversammlungen im 19. Jahrhundert wird mitgeteilt und über Aufgabenstellung, Methodik und Quellen der vorgelegten Arbeit Rechenschaft abgelegt. Eigene Kapitel befassen sich mit den Grundzügen der Theoretischen Pathologie auf den Naturforscherversammlungen vor 1872 und der weiteren Entwicklung der 1872 gegründeten Fachabteilung für Pathologische Anatomie bis zur Gründung der Deutschen Pathologischen Gesellschaft im Jahre 1897. Die problemgeschichtlichen Kapitel umfassen die Themen Epidemien und Infektionskrankheiten, Entzündungen, Krankheiten des Herzens, der Blutgefässe und des Blutes, Geschwülste, Tuberkulose, Krankheiten von Darm, Leber und Niere, pathophysiologische und pathochemische Störungen (Konkremente, Diabetes mellitus, Kropf und Kretinismus), Erkrankungen der Knochen und des Bewegungsapparates, Neuropathologie und Psychopathologie sowie Missbildungen. In der zusammenfassenden Diskussion untersucht der Autor den Wandel der Krankheitsauffassungen und kommt zum Schluss, dass es sich dabei um einen Konzeptwandel (Rothschuh) und nicht um einen Paradigmawechsel (Kuhn) handelt. In der naturwissenschaftlichen Morphologie, wie sie durch Virchow vertreten wird, erhält die Pathologie nämlich erst ein Paradigma, das heisst eine Synthese, die «beispiellos genug (ist), um eine ständige Gruppe von Anhängern anzuziehen, ... und gleichzeitig ... noch offen genug (ist), um der neu bestimmten Gruppe von Fachleuten alle möglichen Probleme zur Lösung zu überlassen» (Kuhn 1967). Das Buch ist mit ausführlichem Anhang und Registern versehen. Es bietet keine langweilige Geschichte einer Fachgesellschaft, sondern einen spannenden Beitrag zum Verständnis des Wandels der Pathologie im 19. Jahrhundert.

Th. Böni

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85,* zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 78.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt,* das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich).* – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042–5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich
Jahrgang 135, Heft 3, September 1990

Inhalt

Beiträge

Berichte und Notizen

Nekrolog

Buchbesprechungen

Preis Fr. 17.–

Heft 4
Jahrgang 135
Dezember 1990

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
SELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85,* zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 83.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt,* das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. em. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich).* – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

5672

erteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/4*: 197–219

erbrennungsaerosole

C. Siegmann, ETH-Hönggerberg

lfältige Fortschritte haben zu einer besseren Erkenntnis der schädlichen Wirkungen geführt, das primäre (Rauch) und das sekundäre (Smog) Verbrennungsaerosol u.a. auf die menschli- Gesundheit, das Wetter und die Pflanzen hat. Grundlage für die dringende Verbesserung der tqualität ist die messtechnische Erfassung der Verbrennungsaerosole. Der traditionell schwie- : Russ ist aus feinen einheitlichen Kugeln, den primären Teerteilchen, aufgebaut, auf denen je h dem Betriebszustand und der Art der Verbrennungsmaschine giftige Stoffe adsorbiert sind. ıspartikel sind Agglomerate von Hunderten von Teerteilchen, deren optische Absorption je- :h trotz der bizarren Formen und dem zwischen der Anwendbarkeit der Rayleigh- und Mie- :orie gelegenen Grössenbereich mit dem Konzept der fraktalen Struktur beschrieben wird. Ad- ɔate auf den Russpartikeln können mit der photoelektrischen Aufladung nach ihrer Desorp- ıstemperatur klassifiziert werden. Der photoelektrische Aerosolsensor erlaubt ausserdem die :ache und dynamische Ermittlung der totalen Masse der karzinogenen Adsorbatgruppe der yzyklischen Aromate (PAH). Damit sollte es dem Gesetzgeber endlich möglich sein, Vorschrif- zur Überwachung der Verbrennungsmaschinen zu erlassen, die den heutigen Bedürfnissen l dem Stand des Wissens Rechnung tragen.

nbustion aerosols

ɪgress in many areas has led to an improved knowledge of the deleterious effects of the pri- ry (smoke) and the secondary (smog) combustion aerosols on human health, weather, and nts. Physical characterization and measurement of the combustion aerosols provides the basis urgent improvement of the air quality. The notoriously difficult soot is built from homoge- ɔus spherules, the primary tar particles, on which poisonous chemicals are adsorbed depending the type and mode of operation of the combustion device. Soot particles are agglomerates of ndreds of primary tar particles, yet their optical absorption is adequately described by the con- ɔt of fractal structure despite the bizarre shapes, and their size range in the transition between : applicability of Mie- and Rayleigh-theory. The adsorbates of the soot particles may be classi- d according to their desorption temperature by photoelectric charging. Additionally, the photo- ctric aerosol sensor offers a simple way to dynamically determine the total mass of the carci- genic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) adsorbed on the particles. Legislature should ıs be able to generate new rules for the survey of combustion devices that are better adapted to : present needs and state of knowledge.

Einleitung

:i der in unserer gegenwärtigen Zivilisation in grossem Massstab betriebe- :n Verbrennung organischen Materials wie Holz, Kohle und Öl entstehen :hwebeteilchen und eine Reihe von Fremdgasen, die mit dem Abgas der Ver- ennung zuerst in die bodennahe Luft gelangen. Die Schwebeteilchen bilden ıs primäre Verbrennungsaerosol, das oft als Rauch bezeichnet wird. Aus den 'emdgasen kann sich durch photochemische Reaktionen nach einigen Stun- :n ein sekundäres Aerosol bilden, das unter dem Namen «Smog» bekannt :. Die Entstehung, Auswirkungen und messtechnische Erfassung der Ver- ennungsaerosole soll im folgenden auch im Hinblick auf mögliche Einflüs-

se auf die Gesundheit und das Wetter behandelt werden. Das primäre Verbrennungsaerosol ist aus ziemlich einheitlichen, kugelförmigen, hauptsächlich aus Kohlenstoff bestehenden Teilchen aufgebaut. Diese Teerteilchen können sich zu ketten- oder traubenförmigen Aggregaten zusammenschliessen, auf denen weitere Substanzen des Abgases kondensiert sind. In dieser Form treten die Teerteilchen dann als Russ oder Rauch in Erscheinung. Die Messung der primären Verbrennungsaerosole ist mit den traditionellen Methoden schwierig. In letzter Zeit sind aber verschiedene Fortschritte in der Beschreibung und messtechnischen Erfassung der Verbrennungsaerosole erzielt worden, die zu einem differenzierteren Verständnis geführt haben. Die Beherrschung der Verbrennungsaerosole ist eine Vorbedingung für den Fortbestand unserer Zivilisation. Daher ist es das Ziel dieser Arbeit, den gegenwärtigen Stand der Kenntnisse zu beschreiben, wobei die globale Erwärmung durch das CO_2 ausgeklammert bleiben soll. Die Verbrennungsaerosole haben einen direkten Einfluss auf die Lebensqualität unserer unmittelbaren Umgebung. Jeder einzelne muss mithelfen, wenn es gelingen soll, die Qualität der Luft, in der wir leben, zu verbessern.

2 Die Bausteine des Russes

Erstaunlicherweise zeigen Russpartikel aus ganz verschiedenen Verbrennungsvorrichtungen im Elektronenmikroskop ein einheitliches Bauprinzip: sie sind aus einzelnen Kugeln mit einem Durchmesser D von zirka 20 nm aufgebaut. Diese primären kugelförmigen Bausteine des Russes sollen im folgenden mit Teerteilchen bezeichnet werden.

Bild 1 Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Russpartikel aus einer schlecht eingestellten Ölheizung, Vergrösserung 1:125 000. Der mittlere Durchmesser der kugeligen Bausteine (Teerteilchen) beträgt D = 24–32 nm.

Fig. 1 Image of a soot aggregate from an ill adjusted oil burner as obtained with the electron microscope at a magnification of 1:125 000. The average diameter of the spherical building blocks (tar particles) is D = 24–32 nm.

Bild 2 Wie Bild 1, aber die Russpartikel stammt aus einem Ottomotor ohne Katalysator bei Vollast; D = 15 nm.

Fig. 2 Like Fig. 1, but the soot aggregate originates from a spark ignition engine without catalyst at full load; D = 15 nm.

partikel können durch Anlagerung von Luftionen aufgeladen und mit ·lektrischen Feld auf dem Objektträger eines Elektronenmikroskops ›schlagen werden. Bild 1 zeigt ein Russpartikel aus einer schlecht ein- ·n Ölheizung eines Einfamilienhauses (Vergrösserung 1 : 125 000). Der Durchmesser D der kugeligen Bestandteile (Teerteilchen) wurde zu D ! nm bestimmt. Bild 2 zeigt ein Russpartikel aus einem Benzinmotor atalysator bei Vollast; trotz ganz unterschiedlichen Verbrennungsbe- ;en ist auch diese Partikel aus primären Kugeln zusammengesetzt; der ıesser der Teerteilchen ergab sich hier etwas kleiner, nämlich zu Bild 3 schliesslich zeigt eine Russpartikel aus einem Dieselmotor bei Last; der mittlere Durchmesser der Teerteilchen ist 26 nm. Die Ölhei- ıd der Benzin- und Dieselmotor sind im Laboratorium für Festkörper- ler ETH installiert mit dem Ziel, die Teerteilchen und die Russbildung rsuchen.

Dieselmotor eines Personenwagens verbraucht etwa 100 g Treibstoff Weg. Die gesamte mit dem Abgas in die Luft emittierte Russmasse be- ka 0,5 g pro km, d. h. 1.8×10^{16} Teerteilchen der Dichte $\varrho = 2$ g/cm^3 pro r Treibstoff wird in Form von Tröpfchen von 15 µm Durchmesser in chkammer eingespritzt. Aus jedem Tröpfchen Treibstoff entstehen 0,3 en Teerteilchen[1].

›r Verbrennungsforschung frägt man sich vor allem, wie es zur einheit- ßildung der primären kugelförmigen Teerteilchen trotz der sehr unter- chen Bedingungen in den verschiedenen Verbrennungsanlagen

rles A. Ammann and Donald C. Siegla, Aerosol Sci. and Techn. *1*, 73 (1982).

Bild 3 Wie Bild 1, aber die Russpartikel stammt aus einem Dieselmotor bei 20% Belastung; D = 26 nm.

Fig. 3 Like Fig. 1, but the soog aggregate originates from a Diesel engine at 20% of full load, D = 26 nm.

kommt. Der Grund für die Existenz der Teerteilchen ist letzten Endes darin zu suchen, dass die im organischen Treibstoff stets enthaltenen Kohlenstoffatome den kinetisch sehr robusten Benzol-Ring bilden können, der erst bei sehr hoher Temperatur aufbricht, um mit Sauerstoff zu reagieren. Mehrere solcher Sechsecke aus Kohlenstoffatomen nebeneinander gelegt ergeben ein Stück Graphitebene, und mehrere Graphitebenen übereinander bilden eine Art Kristallit, aus denen die Teerteilchen aufgebaut sind. Ein Teerteilchen enthält etwa 10^6 C-Atome. Die Verunreinigungen sind vor allem Wasserstoff. Während im Treibstoff das Verhältnis von H- zu C-Atomen etwa bei 2 liegt, ist es in den Teerteilchen auf $\sim$ 0,2 abgesunken. Der Wasserstoff verbrennt also erwartungsgemäss wesentlich effizienter als der Kohlenstoff.

Die wohlbekannte Kerze ist eine geniale Verbrennungsmaschine, da sie unter idealen Bedingungen überhaupt keine Teerteilchen produziert. Durch die Wärmestrahlung der Flamme wird das Wachs geschmolzen, steigt durch Kapillarkräfte im Docht hoch und verdampft. Im Gegensatz zum Benzin- oder Dieselmotor verdunstet der kalte Treibstoff also nicht. Der Wachsdampf vermischt sich mit Sauerstoff, und es entstehen in einer ersten Reaktion vielerlei organische Kohlenstoffverbindungen und Radikale. Die Analyse des Lichtes der bläulichen Flamme im unteren Teil zeigt, dass C_2-, CH- und OH-Fragmente reichlich vertreten sind. In dem Masse, wie die Gase nach oben strömen, wird der Sauerstoff knapp. Daher entstehen nun aus den Radikalen grössere organische Moleküle. Allerdings sind die Temperaturen weit über ›00 °K, so dass nur die kinetisch robusten Moleküle haltbar sind, nämlich

: polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH), die bereits ei-
ge Sechserringe des C enthalten. An diesen kondensieren dann weitere Mo-
:üle und Radikale. So kommt es zur Entstehung von sehr feinen Tröpfchen
s Kohlenwasserstoffen. Die Tröpfchen sind so heiss, dass sie das schöne
lb-weisse Licht der Wachskerze emittieren. Die spektrale Verteilung des
:hts ist die eines schwarzen Strahlers, also typisch für die Emission konden-
rter Materie. Am Rand der Flamme kommt nun frischer Sauerstoff zu den
öpfchen. Wenn alles gut geht, d.h. wenn die Tröpfchen noch heiss genug
.d, dann verbrennen sie wieder vollständig.

Werden allerdings die idealen Verhältnisse gestört, z.B. durch einen Luft-
g oder durch einen kalten Gegenstand in der Flamme, so kühlen die Tröpf-
:n ab, bevor sie verbrennen können. Damit sind die Teerteilchen entstan-
n; ihre Kugelgestalt erklärt sich also durch das flüssige Stadium, das sie
rchlaufen haben. Durch Agglomeration der Teerteilchen können schliess-
h die mit dem blossen Auge sichtbaren Russpartikel entstehen. Im flüssigen
stand sind die Teerteilchen so heiss, dass sie sich durch thermische Emis-
n von Elektronen positiv aufladen können. Diese positive Ladung bleibt
ch nach dem Abkühlen noch recht lange erhalten, weil der Wiedereinfang-
erschnitt für Elektronen mit dem Durchmesser D der Teilchen abnimmt,
o bei den kleinen primären Teerteilchen am kleinsten ist. Sobald sich aber
ı Agglomerat mit grösserem D' gebildet hat, wird es Elektronen viel effi-
nter einfangen, also bevorzugt negativ geladen sein. Nun entsteht eine elek-
statische Anziehung zwischen Agglomeraten und primären Teerteilchen,
: an den Spitzen der Agglomerate am grössten ist. Dadurch werden neue
imäre Teerteilchen vorwiegend an den Spitzen angelagert, und es kommt
r Ausbildung der auffälligen Ketten, die in den Bildern 1–3 deutlich zu er-
nnen sind.

Bei ungünstigem Verlauf der Verbrennungen sind im Abgas auch noch die
lyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe aus der Nukleationsphase
r Teerteilchen vorhanden. Beim Abkühlen kondensieren diese auf der
erfläche der Teerteilchen. Auch andere noch im Abgas vorhandene Stoffe
ıden schliesslich auf der Oberfläche der eventuell schon agglomerierten
erteilchen. Bild 4 zeigt eine Auswahl polyzyklischer aromatischer Kohlen-
ısserstoffe. Die Strukturen illustrieren das Bauprinzip aus C-Sechsecken
.d die Vielfalt der möglichen Spezies. Bei den Bedingungen der Aussenluft
:rden nur die Spezies mit 4 und mehr C-Ringen auf der Oberfläche der
erteilchen gefunden; die kleineren PAHs haben einen höheren Dampf-
uck und bleiben daher in der Gasphase.

Im Bild 5 kann man die nachträgliche Kondensation auf den Teerteilchen
w. Agglomeraten erkennen. Links sind Russteilchen aus dem Benzinmotor
ı Standgas, rechts solche bei Vollast elektronenmikroskopisch in der Ver-
össerung 1:30 000 dargestellt. Obwohl bei Vollast die Anzahl der Teerteil-
en enorm viel grösser ist, bleibt das Grundprinzip des Aufbaus aus einzel-
n primären Kugeln erhalten. Der mittlere Durchmesser der Teerteilchen

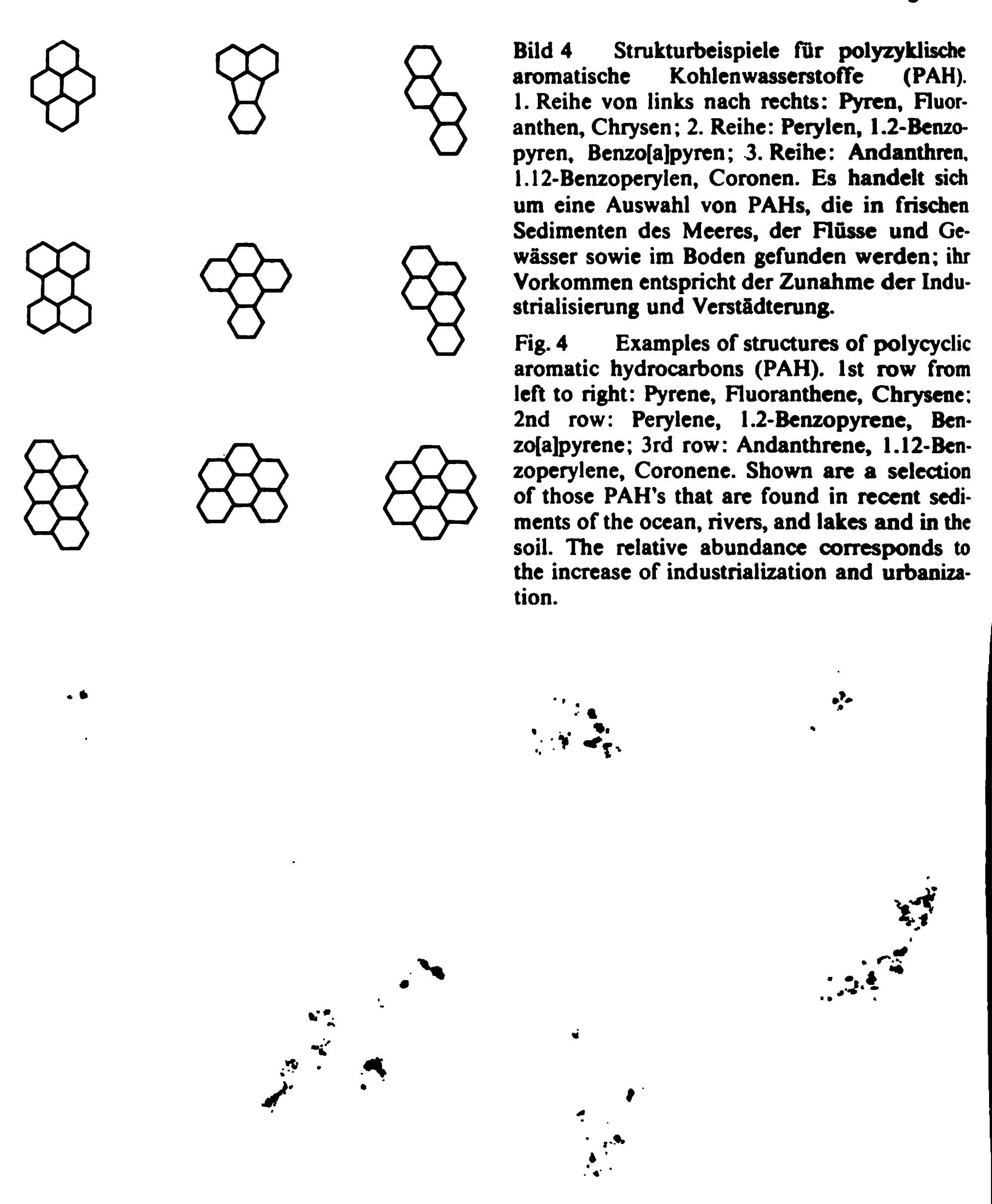


Bild 4 Strukturbeispiele für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH). 1. Reihe von links nach rechts: Pyren, Fluoranthen, Chrysen; 2. Reihe: Perylen, 1.2-Benzopyren, Benzo[a]pyren; 3. Reihe: Andanthren, 1.12-Benzoperylen, Coronen. Es handelt sich um eine Auswahl von PAHs, die in frischen Sedimenten des Meeres, der Flüsse und Gewässer sowie im Boden gefunden werden; ihr Vorkommen entspricht der Zunahme der Industrialisierung und Verstädterung.

Fig. 4 Examples of structures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). 1st row from left to right: Pyrene, Fluoranthene, Chrysene; 2nd row: Perylene, 1.2-Benzopyrene, Benzo[a]pyrene; 3rd row: Andanthrene, 1.12-Benzoperylene, Coronene. Shown are a selection of those PAH's that are found in recent sediments of the ocean, rivers, and lakes and in the soil. The relative abundance corresponds to the increase of industrialization and urbanization.

Bild 5a und b Russpartikel aus einem Ottomotor im Leerlauf (a, links) und bei Vollast (b, rechts); Vergrösserung 1 :30 000. Der mittlere Durchmesser der kugelförmigen Teerteilchen ist D = 25 nm im Leerlauf (a) und D = 15 nm bei Vollast (b).

Fig. 5a and b Soot aggregates from a spark ignition engine when idling (a) and at full load (b). Magnification 1 :30 000. The average diameter of the spherical tar particles is D = 25 nm for (a) and D = 15 nm for (b).

nimmt allerdings von 25 nm im Leerlauf auf 15 nm bei Vollast ab. Man sieht, dass im Leerlauf auch auf den bereits agglomerierten Teerteilchen, also den schon fertigen Russpartikeln, noch Stoffe kondensiert sind; die eigentlichen kugelförmigen Bausteine sind aber noch andeutungsweise zu erkennen. Der wichtigste Unterschied Leerlauf/Vollast besteht darin, dass im Leerlauf die Abgase kälter sind, also mehr Stoffe den Kondensationspunkt überschreiten, bevor das Abgas mit der Aussenluft verdünnt wird.

PAHs und insbesondere das sehr robuste Coronen $C_{24}H_{12}$, das aus 7 Benzolringen aufgebaut ist, sind auch in der Astronomie von Interesse. Leger und d'Hendecourt[2] haben vorgeschlagen, die sogenannten «unidentified infrared emission bands», die vom interstellaren Medium emittiert werden, auf die Emission von PAH-Anhäufungen zurückzuführen. Der grösste Teil der interstellaren Masse wird von kalten roten Riesen emittiert, und die Gase kühlen sich durch adiabatische Expansion ab. Wenn etwa 1000 °K erreicht sind, nukleieren kleine Teilchen. Was dabei entsteht, hängt vom Verhältnis C/O ab. Wenn C/O > 1, so spricht man von einem kohlenstoffreichen Stern, und die Bedingungen für eine reichhaltige Kohlenstoffchemie inklusive Bildung von PAHs und Teerteilchen sind gegeben. Tatsächlich konnten Busoletti, Colangeli und Borghesi[2] zeigen, dass irdische Russpartikel die geheimnisvollen Infrarotbanden genau reproduzieren können. Offenbar werden die PAH auch unter kosmischen Bedingungen gebildet. Was es dazu braucht, ist nur Kohlenstoff bei einigen 1000 K und relativer Mangel an Sauerstoff.

3 Verbrennungsaerosole und Gesundheit

Obwohl die Menschheit schon immer mit dem Feuer lebte, hat es sehr lange gedauert, bis die schädlichen Wirkungen des Russes entdeckt wurden. Percivall Pott bemerkte 1775 die hohe Rate des Hautkrebses bei Kaminfegern. Die Beobachtung führte zu der Entdeckung, dass die Verbrennungsprodukte der Kohle an jeder Stelle der Haut, mit der sie in Kontakt gebracht werden, Krebs erzeugen. Man stellte weiter fest, dass sich mit Russ der Hautkrebs auch bei Mäusen erzielen lässt. Damit war die erste karzinogene Substanz aus der Umwelt isoliert. In neuerer Zeit wurde die Verursachung von Bronchialkrebs durch Zigarettenrauchen eindeutig belegt. Auch einige andere Krebsarten sind dem Tabakrauchen zuzuordnen. Allerdings tritt die Krankheit erst viele Jahre nach Beginn des Rauchens auf, und die Wahrscheinlichkeit, krank zu werden, klingt auch erst 15 Jahre nach Beendigung der Exposition ab. Lange Zeit galt es als ungewiss, ob ein Passivraucher, d.h. jemand, der nicht selbst raucht, aber in rauchhaltiger Luft lebt, ebenfalls gefährdet ist. Die neuesten epidemiologischen Studien zeigen, dass auch beim Passivrauchen mit Krebsgefährdung zu rechnen ist[3].

[2] Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Astrophysics. A. Leger, L. d'Hendecourt, and N. Boccara, ed., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1987.

[3] Passivrauchen am Arbeitsplatz, Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, D. Henschler ed., VCH Verlagsges., D-6940 Weinheim, 1985.

Es ist schon früh vermutet worden, dass Verbrennungsaerosole karzinogen sind, weil sie PAHs enthalten. Diese Vermutung hat sich in vielen Tierversuchen bestätigt; Grimmer und Mitarbeiter haben auch gezeigt, dass praktisch die gesamte karzinogene Wirkung der Verbrennungsabgase an Partikel gebunden ist. Es handelt sich daher vor allem um die schweren PAH. Benzo[a]pyren wurde schon früh als besonders gefährlich erkannt, seine Struktur ist in Bild 4 gezeigt; es dient oft als Leitsubstanz für Karzinogenität. Man weiss allerdings noch nicht, wie Benzo[a]pyren oder andere PAHs die Krankheit erzeugen und ob dabei noch andere Substanzen beteiligt sind. *Jedenfalls ist heute klar, dass die PAHs und andere Chemikalien mit den Verbrennungsaerosolen in den Körper gelangen.*

Bild 6 zeigt die Abscheidecharakteristik der menschlichen Atmungsorgane und eine typische Grössenverteilung der Schwebeteilchen des Dieselmotors, aufgetragen ist die Anzahl der Teilchen als Funktion des aerodynamischen Teilchendurchmessers. Das Filterprinzip der Nase beruht auf der Trägheit. Die Stromlinien der Luftströmung um ein Hindernis, z. B. ein Haar, sind gekrümmt. Die grossen Teilchen fliegen wegen ihrer grossen trägen Masse gerade weiter und treffen auf das Hindernis, ähnlich wie eine fette Fliege auf die Windschutzscheibe prallt. Die kleinen Teilchen folgen aber der Strömung und werden daher nicht abgefangen. Bild 6 zeigt, dass besonders die Partikel mit Durchmesser kleiner als 1 μ die Nase passieren und hauptsächlich in den Bronchien und der Lunge abgeschieden werden, d. h. das Verbrennungsaerosol, gleichgültig ob agglomeriert oder nicht, wird in der Lunge und den Bronchien deponiert. Der Körper kann die Teerteilchen und ihre Agglomerate erst nach Monaten wieder ausstossen. *Es entsteht daher eine Schwärzung der Lunge (Anthrakose), deren Ausmass bei Nichtrauchern mit dem Grad der Luftverschmutzung korreliert.*

Schon allein die Tatsache, dass die Fremdstoffe der Verbrennungsaerosole auch in den Atmungsorganen der Nichtverursacher, z. B. alten Leuten und Kindern, abgelagert werden, sollte den Juristen und Hütern der Grundrechte zu denken geben. Dazu kommt aber für alle die Erhöhung des Krebsrisikos. In einem sehr gründlichen und objektiven Buch über nicht reglementierte Luftgifte wird das jährliche Todesrisiko in New Jersey auf Grund des Gehaltes der Luft an PAHs auf 3.10^{-4} geschätzt[4]. Das ist eine nicht mehr zumutbare Gefährdung des Menschen. In der BRD enthält die «Technische Anleitung Luft» von 1986 maximale Grenzwerte für Benzo[a]pyren. Eine Expertenkommission stellte offenbar kürzlich fest, dass diese Grenzwerte bei Dieselabgasen um mehr als das 200fache überschritten werden. Damit sind die Dieselabgase für jeden fünften Krebstoten verantwortlich, der der Luftverschmutzung zum Opfer fällt[5].

[4] Toxic Air Pollution. Paul J. Lioy and Joan M. Daisey. Lewis Publ. Inc., Chelsea, Michigan, 1987.

[5] Der Spiegel, *11*, 1990, p. 13.

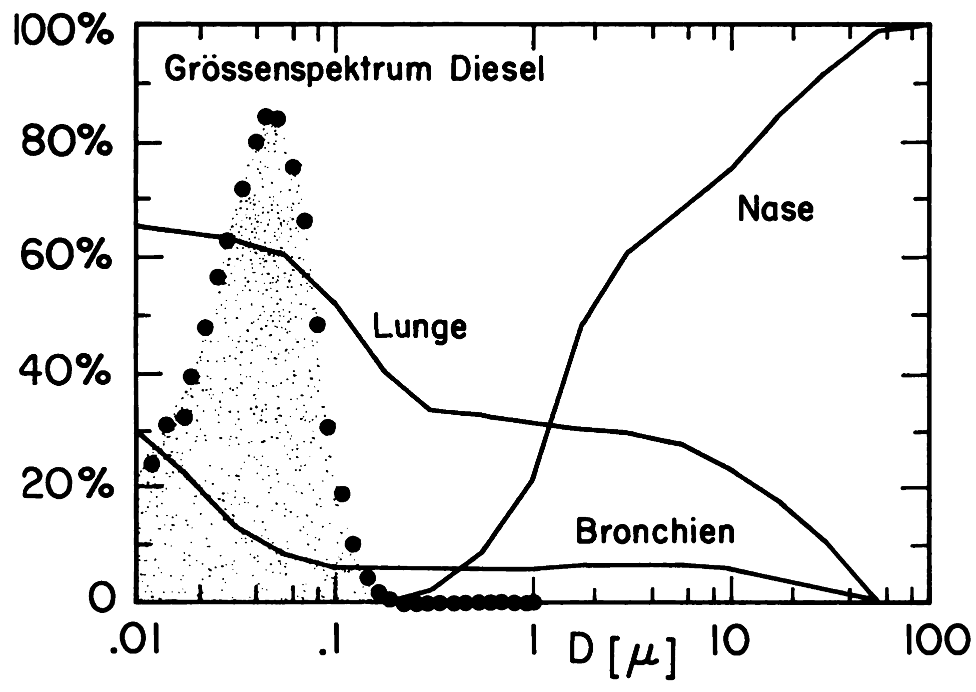


Bild 6 Abscheidecharakteristik der menschlichen Atmungsorgane nach J. Heyder et al., J. of Aerosol Sci. *17*, 811 (1986), und Anzahl der Schwebeteilchen aus einem Dieselmotor in relativen Einheiten nach A. Leonardi, Laboratorium für Festkörperphysik ETH, unveröffentlicht, in Funktion des aerodynamischen Durchmessers der Teilchen. Man sieht, dass das Verbrennungsaerosol so feindispers ist, dass es von der Nase nicht zurückgehalten wird.

Fig. 6 Precipitation efficiency of the human respiratory tract according to J. Heyder et al., J. of Aerosol Sci. *17*, 811 (1986) and number of airborne particles from a Diesel engine in relative units according to A. Leonardi, Laboratory for Solid State Physics ETH, unpublished, as a function of the aerodynamic diameter of the particles. It can be seen that the combustion aerosols are so finely dispersed that they are not retained by the nose.

Die derzeitige grobe Bestandesaufnahme erlaubt noch keine verlässliche differenzierende Risikobewertung zwischen Benzin- und Dieselmotoren. Die vorliegenden Mutagenitätsuntersuchungen deuten allerdings darauf hin, dass zwischen Dieselmotor- und Benzinmotor-Abgas kein massgeblicher Unterschied im Hinblick auf gentoxisches Material besteht[6].

Angesichts der Lungengängigkeit der Verbrennungsaerosole und angesichts der Tatsachen, die von den Experten heute vorgewiesen werden[7], ist die Sorglosigkeit der Öffentlichkeit ganz unverständlich. Will man die Tierexperimente an Menschen wiederholen?

[6] Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAKWerten. D. Henschler ed., VCH, 1988, und 1.–15. Lieferung 1989.

[7] E. Lehmann, K. H. Reutel, W. Allescher, R. Hohmann, Zbl. Arbeitsmed. *40*, 2 (1990), und dort zitierte Referenzen.

Akute Erkrankungen der Atemwege sowie unmittelbare Schädigungen von Pflanzen und Gebäuden werden von hohen Ozongehalten der Luft erzeugt. Das Ozon entsteht bei entsprechendem sonnigem Wetter in photochemischen Reaktionen aus den Fremdgasen, die von den Verbrennungsmaschinen immittiert werden[8]. Der Ozonüberschuss kommt dadurch zustande, dass mehr Ozon bei der Photolyse von NO_2 entsteht, als zur Bildung des NO_2 aus dem primären NO verbraucht wird. Die Bildungsrate des Ozons wird in Anwesenheit reaktiver Kohlenwasserstoffe beträchtlich intensiviert. Die besorgniserregende Zunahme der Krankheiten der Atemwege namentlich bei Kindern ist den hohen Ozongehalten zuzuschreiben. Am 6. November 1986 sahen sich 3500 Schweizer Ärzte zu einem Aufruf veranlasst, in dem der Bundesrat und die kantonalen Behörden aufgefordert wurden, Notstandsmassnahmen zu ergreifen und den Benzinverbrauch drastisch zu reduzieren[9]. Seither ist bekanntlich nichts geschehen, ganz im Gegenteil verdeutlicht die Entwicklung der Immissionsfaktoren für Motorfahrzeuge, dass die ergriffenen immissionsmindernden Massnahmen nicht ausgereicht haben, um die aus dem Anstieg der Jahresfahrleistung folgende Erhöhung auszugleichen.

4 Können Verbrennungsaerosole das Wetter beeinflussen?

Natürlich wäre es nützlich, wenn der Mensch das Wetter beeinflussen könnte, z. B. Regen machen oder den Regen aufhören lassen, Hagel vermeiden oder den Nebel vom Flughafen entfernen. Es hat nicht an Versuchen gefehlt[10], aber leider ist es sehr wahrscheinlich, dass die Technik bis jetzt jedenfalls nicht in der Lage ist, gezielte Eingriffe in das Wetter vorzunehmen[11]. Beim Wetter handelt es sich um die Umsetzung unvorstellbar grosser Energiemengen. Trotzdem muss heute mit einem unkontrollierten Einfluss menschlicher Aktivitäten auf das Wetter gerechnet werden.

Die primären Teerteilchen und ihre Agglomerate sind schwarze Körper. Sie absorbieren das Sonnenlicht nach Rayleigh proportional zu ihrem Volumen, weil ihr Durchmesser viel kleiner als die Lichtwellenlänge ist. Diese zusätzliche Absorption ist aber zu vernachlässigen, weil das Volumen des Russes sehr gering ist. Erst wenn in einem Atomwaffenkrieg riesige Brände entstehen und die Russpartikel in grosse Höhen gelangen, kann ein direkter Einfluss der in der Luft schwebenden Russpartikel auf das Klima entstehen

[8] Kraftfahrzeugemissionen und Ozonbildung, N. Moussiopoulos, W. Oehler, K. Zellner. Springer 1989.

[9] Neue Zürcher Zeitung 6. Nov. 1986.

[10] Künstliche Wetterbeeinflussung. A. Waldvogel. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, Kiel 1984.

[11] B. Federer, A. Waldvogel, W. Schmid, H. H. Schiesser, F. Hampel, Marianne Schweingruber, W. Stahel, J. Bader, J. F. Mezeix, Nadine Doras, G. d'Aubigny, G. Der Megreditchian, D. Vento. J. of Climate and Appl. Meteorology *25*, 917 (1986).

(Nuclear Winter[12]). Dagegen haben die Schwebeteilchen aus Verbrennungen einen massiven Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit der bodennahen Luft. Durch die Radioaktivität des Erdbodens, das natürlich radioaktive Radon und die kosmische Strahlung werden in der Luft gleich viel positive und negative Ionen erzeugt. Diese Ionen sorgen für die Elektrizitätsleitung der Luft nach Massgabe ihrer Dichte ν. Die Ionen können durch Rekombination wieder verschwinden oder auch durch Anlagerung an die Schwebeteilchen so schwer beweglich werden, dass sie nichts mehr zur elektrischen Leitung beitragen. Im Gleichgewicht muss die Erzeugungsrate q (Ionenpaare/cm^3 sec) gleich der Vernichtungsrate sein. In staubfreier Luft gilt $q \cong 10^{-6}\,\nu^2$, $\nu = \sqrt{q \cdot 10^6}$. In Luft mit Schwebeteilchen der Dichte n gilt $q \cong 10^{-6} \cdot n \cdot \nu$, $\nu = (q \cdot 10^6)/n$. In unseren Gegenden ist $q = 10$ Ionenpaare/($cm^3 \cdot$ sec). Typische Werte für Stadtluft[13] sind $n \cong 10^5$ Schwebeteilchen/cm^3. Es ist also $\nu \cong 3000$ Ionen/cm^3 in staubfreier und $\nu = 100$ Ionen/cm^3 in Luft mit Schwebeteilchen. Luft mit Schwebeteilchen leitet daher die Elektrizität zehnmal schlechter als saubere Luft. Da man die atmosphärische Elektrizität sehr schlecht versteht, weiss man bis heute gar nicht, ob und welchen Einfluss dieser massive Eingriff z.B. auf Gewitter haben könnte.

Der direkte Einfluss der Teerteilchen und ihrer Agglomerate auf das Wetter kann also vernachlässigt werden oder ist im Falle der Elektrizität noch unerforscht. Demgegenüber können aber die sekundären Verbrennungsaerosole, d.h. die Schwebeteilchen, die sich erst aus den Abgasen der Verbrennungsmaschinen in der Luft bilden, den Energiehaushalt der Atmosphäre nachweislich massiv verändern. Der Nachdruck liegt hier auf «nachweislich», denn man kann sich gemäss den Erfahrungen der Vergangenheit vorstellen, dass die Menschen sich ewig darüber streiten könnten, ob eine Nebeldecke sich nun früher aufgelöst hätte, wenn an einem bestimmten Tag die Luft sauber gewesen wäre. Das Problem mit dem Wetter ist, dass man niemals den gleichen Versuch wiederholen kann.

Die Bildung der sekundären Verbrennungsaerosole aus den gasförmigen Verbrennungsprodukten wurde zuerst in der natürlicherweise glasklaren Atmosphäre von Kalifornien bemerkt. Sie geschieht jedoch auch in unseren Gegenden, wie vor allem am EAWAG[14] für den Fall von Zürich gezeigt wurde.

Die bei der Verbrennung entstehenden Oxyde des C, N und S sind hauptsächlich an der Bildung des sekundären Verbrennungsaerosols beteiligt. Es ist eine grosse Zahl von Reaktionen, die zur Partikelbildung führen, identifiziert worden. Hier sollen nur 2 typische Beispiele angeführt werden, in denen auch das z.T. aus natürlichen Prozessen in der Luft vorhandene Ammoniak NH_3 eine Rolle spielt. HNO_3 entsteht als Gas direkt in der Verbrennung oder bildet sich durch Oxydation des NO_x unter der Einwirkung von Sonnenlicht und/

[12] Barbara G. Levi and Tony Rothmann. Physics Today *38*, No. 9, p. 58 (1985).
[13] P. Hasenclever und H.C. Siegmann. Staub *20*, 212 (1960).
[14] Laura Sigg, Werner Stumm, Jürg Zobrist, and Fritz Zürcher. Chimica *41*, 159 (1987).

oder Ozon erst in der Atmosphäre. Daraus entstehen Teilchen aus Ammoniumnitrat gemäss

$$(HNO_3)_{Gas}+(NH_3)_{Gas}\rightarrow(NH_4NO_3)_{Aerosol}.$$

Auch das SO_2 kann in der Luft in ein paar Stunden zu H_2SO_4 oxydiert werden. Daraus entstehen Teilchen aus Ammoniumsulfat gemäss

$$(H_2SO_4)_{Gas}+2(NH_3)_{Gas}\rightarrow((NH_4)_2SO_4)_{Aerosol}.$$

Diese Teilchen sind nun im Gegensatz zu den Teerteilchen hygroskopisch, d.h., sie lösen sich in Wasser auf. Daher erfahren sie ein ganz anderes Schicksal als die Teerteilchen, die hydrophob sind, d.h. sich nicht in Wasser auflösen. Das auf der Oberfläche der Teerteilchen kondensierte Wasser muss wieder verdunsten, weil eine gekrümmte Oberfläche einen gegenüber der ebenen Wasseroberfläche erhöhten Dampfdruck hat. Die hydrophoben Teerteilchen bleiben daher immer klein, was zu einer sehr grossen Aufenthaltszeit von Monaten in der Atmosphäre führt, bis sie schliesslich durch Regen oder Nebel wieder ausgewaschen werden. In den Ammoniumsulfat- oder Nitratteilchen dagegen löst sich das Wasser auf. Das führt bekanntlich nach dem Raoultschen Gesetz zu einer Dampfdruckerniedrigung, welche die Dampfdruckerhöhung der gekrümmten Oberfläche bei einem bestimmten Teilchenradius genau kompensiert[15]. Je nach Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur der umgebenden Luft bildet sich dann ein Nebeltröpfchen mit Durchmesser $5\ \mu m \leq D \leq 50\ \mu m$[14]. D ist also grösser als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, das nun kräftig gestreut wird. Daher sind die Nebeltröpfchen sichtbar. Zudem führt Nebelbildung über der Oberfläche der Erde zu einer Änderung Δ E der von der Sonne eingestrahlten Energie E gemäss

$$\Delta E = S \cdot \Delta\alpha.(\cos Z) \cdot F \cdot t \tag{1}$$

S ist die Solarkonstante, d. h. 1365 Watt pro m^2 und pro sec, $\Delta\alpha$ die Änderung des Rückstrahlvermögens der Erde (Albedo) durch die zusätzliche Nebelbildung, Z der Zenitwinkel der Sonne, F die Fläche, die vom Nebel betroffen ist, und t die Zeit, während der der Nebel vorhanden ist.

$\Delta\alpha$ wird derzeit in grossem Massstab von Satelliten vom Weltall aus gemessen[16]. Twomey, Gall und Leuthold[17] haben bemerkt, dass Schiffe im Pazifischen Ozean stärker reflektierende Wolken von 20 km Breite hinterlassen, die von Satelliten aus klar identifiziert werden können. Die stark reflektierenden

[15] An Introduction to Atmospheric Physics. Robert G. Fleagle and Joost A. Businger. Academic 1980.

[16] V. Ramanthan, Bruce R. Barkstrom and Edwin F. Harrison. Physics Today *42*, 5, p. 22 (1989).

[17] S. Twomey, R. Gass, and M. Leuthold. Boundary layer Meteorology *41*, 335 (1987).

Wolkenspuren der Schiffe entstehen nur dann, wenn vorher schon Nebel vorhanden ist. Das bedeutet, dass die vom Schiff stammende Luftverschmutzung zwar die schon vorhandene Wolke in ihrer Helligkeit verstärken kann, dagegen nicht in der Lage ist, neue Wolken zu erzeugen. Mit $F = 100$ km×20 km, $\Delta\alpha = 0.1$, $Z = 33°$ und $t = 1$ h erhält man aus Gl.(1) $\Delta E = 230$ Gigawattstunden, d.h. in 50 Stunden ergibt sich der jährliche totale Energieverbrauch der Stadt Zürich. Der Effekt führt zur Abkühlung, da die Wolke die Sonnenstrahlung ins Weltall zurückwirft und eine kompensierende Infrarotreflektion nicht vorhanden ist[17]. Die Erklärung ist einfach und erstaunlich. Sie beruht darauf, dass aus den Abgasen des Schiffes zusätzliche hydrophile Kondensationskerne zur Verfügung stehen. Das Wasser verdampft nun von den grossen Tropfen und kondensiert auf den neuen Kondensationskernen, bis ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Es entstehen also mehr, aber dafür kleinere Nebeltröpfchen. Da die Gesamtmasse des flüssigen Wassers erhalten bleibt, kommt die latente Wärme des Wassers nicht ins Spiel, d.h. es werden keine grossen Energiemengen umgesetzt. Die Reflexion einer Wolke hängt von der Tropfengrösse ab; sie wird grösser, wenn die Tropfen kleiner werden[17]. Zur Erklärung der beobachteten Albedoveränderung genügt es, dass mit den Abgasen des Schiffes ein paar kg SO_2 oder NO_x pro Stunde in die Atmosphäre gelangen[17]. Allein im Stadtgebiet Zürich wurde die Luft im Jahre 1988 aus Feuerungen und Verkehr, also aus Verbrennungsmaschinen, mit 4067 t SO_2 und 6015 t NO_2 belastet, d.h. z.B. 700 kg NO_x pro Stunde. Die Veränderung des Nebels ist also nach unserem heutigen Wissen Realität. Sie führt zu einem Energiedefizit, also zu einer lokalen Abkühlung. Wie und ob dieses die grossräumige Wetterlage beeinflusst, ist derzeit nicht vorherzusagen[16]. Jedenfalls handelt es sich um ein sehr riskantes Experiment, das man besser sofort abbricht. Ganz abgesehen von der Blockierung der Sonnenstrahlung enthalten die Nebelteilchen über Zürich 10–50mal mehr Verunreinigungen als der Regen[14]. Es werden pH-Werte des Nebelwassers von bis zu 2 beobachtet[14]. Die Verunreinigungen bestehen aus Ammonium, Sulfat, Nitrat und Chlorionen sowie organischen Säuren und Metallspuren; die sind vor allem an der Obergrenze des Herbst- und Winternebels und an den Inversionsschichten angereichert. Dort finden sich auch die grössten Konzentrationen der Teerteilchen[18]. Der Nebel schlägt sich auf den Nadeln, Blättern, den Äpfeln, dem Gemüse usw. nieder. Er führt zusätzlich zum Ozon[9] zur Schädigung der Pflanzen und Gebäude und ist sicherlich auch für den Menschen nicht gesund.

Im Bild 7 ist ein mit Schreibmaschine beschriebenes weisses Papier auf dem Schnee photographiert. Das Bild wurde im Januar 1987 auf einem Feld in der Nähe der ETH-Hönggerberg in etwa 1 km Entfernung von der nächsten Strasse aufgenommen. Man sieht, dass der Schnee wesentlich dunkler ist als das weisse Papier. Das Phänomen des «schwarzen» Schnees wurde schon mehrmals beobachtet. Es entsteht dann, wenn es aus der Inversionsschicht

[18] B. Federer, H. Burtscher, A. Schmidt-Ott and H.C. Siegmann. Atmospheric Environment *17*, 655 (1983).

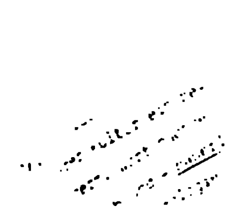


Bild 7 «Schwarzer Schnee», photographiert im Januar 1987 am Hönggerberg in der Nähe von Zürich. Die nächste Strasse ist etwa 1 km entfernt. Das Papier mit der Schreibmaschinenschrift dient als Massstab für die Schwärzung des Schnees.

Fig. 7 "Black Snow" as photographed in January 1987 on a hill close to the city of Zürich. The nearest street is at 1 km distance. The paper with the typewritten letters serves to gauge the blackening of the snow.

heraus schneit. Die dunkle Färbung kommt daher, dass die Schneeflocken die Russpartikel der Luft einfangen und so mit auf die Erde befördern. Nimmt man nur die für schmutzigen Schnee bekannte Albedoänderung von 0.2 an, so ergibt sich für einen Kreis mit Radius 25 km als Fläche, einer Sonnenscheindauer von insgesamt 60 Stunden und mit dem mittleren winterlichen Zenitwinkel von 70° aus Gl.(1) ein Energiegewinn durch Mehrabsorption von Sonnenlicht, der wiederum etwa dem gesamten jährlichen Energieverbrauch der Stadt Zürich entspricht. Man sieht also, dass sogar durch die vergleichsweise «winzigen» Substanzmengen der Russteilchen (150 t/Jahr in Zürich) gewaltige Defizite oder Überschüsse von Sonnenenergie entstehen können. Diese sind durchaus in der Lage, das Wetter zu verändern. Es ist klar, dass zusätzlich noch der Einfluss der Treibhausgase, insbesondere die durch die Verbrennung organischer Brennstoffe erzeugte Zunahme des CO_2, berücksichtigt werden muss. Diese führen zu einer globalen Erwärmung, deren Ausmass zwischen 1 und 4 °C für die nächsten Jahrzehnte geschätzt wird. Die Hauptunsicherheiten liegen in der Rückkoppelung zwischen Wolkenstruktur und der Erwärmung der Atmosphäre durch die erhöhte Infrarotabsorption[19].

[19] Barbara Goss Levi, Physics Today 43, No. 2, p. 17 (1990).

5 Messung der Verbrennungsaerosole

Die Öffentlichkeit erhofft sich von der objektiven messtechnischen Erfassung der Verbrennungsaerosole die dringend nötige Verbesserung der Luftqualität. Der Gesetzgeber definiert bisher die primären Verbrennungsaerosole z.B. bei Dieselmotoren als die Masse aller festen und flüssigen Schwebeteilchen, ausser Wasser, die sich auf einem Filter niederschlagen, durch welches ein verdünnter Strom des Abgases gesaugt wird; das Filter muss kälter als 52 °C sein. Bei einem bestimmten Fahrplan darf die gesamte auf dem Filter niedergeschlagene Teilchenmasse einen vorgegebenen Wert, z.B. 0,3 g/km, nicht überschreiten. Für Lastwagen gibt es in der Schweiz nur eine Typenprüfung. Beim einzelnen Lastwagen wird nur im Stand ein Referenzwert bei Durchtreten des Gaspedals ermittelt. Auch die Beurteilung der Aerosole nur nach der Masse ist natürlich ganz unbefriedigend. Die Vorschrift entspricht der Mentalität unserer Grossväter, die am Russ nichts anderes störte, als dass er unästhetisch ist, z.B. die weissen Hemdkragen schwärzt. Also beurteilten sie die Verbrennungsmaschinen mit der sogenannten Russpumpe, bei der ein bestimmtes Volumen des Abgases durch ein weisses Filterpapier gesaugt wird. Die Schwärzung des Filters dient bis heute als Mass für die Beurteilung des primären Verbrennungsaerosols. Damit kann man gut feststellen, wie schnell die Hemdkragen schwarz werden, aber wieviel Teerteilchen in die Lunge kommen und ob sie dort gesundheitlichen Schaden anrichten, lässt sich freilich kaum eruieren. Einige Arbeiten zeigen sogar explizit, dass bei der kleinsten Russzahl die Mutagenität am höchsten ist[20, 21]. Obwohl die Feuerungsanlagen in Zürich mit dem Russtest vergleichsweise streng überwacht werden, ist trotzdem der schwarze Schnee (Bild 7) gefallen. Eine Feuerungsanlage, bei der sich das Filter so geschwärzt hätte wie der Schnee, hätte den Test nicht passiert. Laut dem soeben erschienenen Umweltbericht 1990 der Stadt Zürich emittierten die Personenwagen im Jahr 1988, gleichgültig ob mit oder ohne Katalysator, keinen Russ. Im Bild 5 sieht man aber, dass das nicht stimmt, sondern im Gegenteil eine Menge lungengängiger Teerteilchen emittiert werden. All dies zeigt, dass die gegenwärtige Praxis der Messung unzulänglich ist.

Ebenfalls häufig verwendet werden optische Methoden zur Beurteilung der Schwebestoffemissionen. Die Farbe des Rauches, blau, weiss, schwarz, wird seit jeher als Verbrennungskenngrösse benützt. Der Schwarzrauch besteht überwiegend aus Kohlenstoff, der Blaurauch aus unverbranntem Kraftstoff und der Weissrauch aus Kondensaten. Auch hier sind grosse Täuschungen möglich und werden zum Teil von der Industrie ausgenützt. Durch Zusätze zum Treibstoff und/oder durch rasche Verdünnung der Abgase lässt sich nämlich die Agglomeration der Teerteilchen herabsetzen. Dann erscheint das

[20] W.G. Thilly. Soot Components as Genetic Hazards, in «Soot in Combustion Systems and its Toxic Properties», J. Lahaye and G. Prado, Plenum, New York 1983.

[21] J.P. Longwell. Polycyclic Hydrocarbons and Soot from Practical Combustion Systems, ibidem.

Abgas in der Aufsicht ganz sauber, obwohl dieselbe Russmasse, nur feiner verteilt, d.h. jetzt lungengängig und mit längerer Aufenthaltszeit in der Atmosphäre, emittiert wird.

Vor etwa 100 Jahren hat Lord Rayleigh das Verhältnis von gestreuter zu auffallender Lichtintensität J/J_o für dielektrische Kugeln, deren Durchmesser D kleiner als die Lichtwellenlänge λ ist, berechnet. Es ergibt sich

$$J/J_o = \text{const} \cdot n \cdot (\varepsilon - 1)^2 D^6/\lambda^4 \qquad (2)$$

Weil die Streuung mit der 6. Potenz von D anwächst, das Volumen aber nur mit der 3., zerstreut dieselbe Menge Substanz um so weniger Licht, je feiner sie verteilt ist. Man sieht auch, dass die gestreute Intensität ausser von der Dichte n der Teilchen auch von der Dielektrizitätskonstante ε der Teilchen relativ zur Umgebung abhängt. Jedenfalls erklärt Gl.(2), warum die Verhinderung der Agglomeration die Abgase in der Aufsicht sauber erscheinen lässt.

Zur Bestimmung der Russmasse muss daher die Absorption gemessen werden; in der Rayleigh-Näherung $D << \lambda/\pi$ ist sie der Russmasse proportional. Es treten aber die folgenden Schwierigkeiten auf:

1) Die agglomerierten Teilchen sind nicht kugelförmig, vgl. Bilder 1, 2, 3 und 5.
2) Wenn der Durchmesser wächst, so dass $D \sim \lambda/\pi$ ist, muss die Miesche Theorie verwendet werden, die ganz andere Ergebnisse liefert, insbesondere nimmt die Streuung relativ zur Absorption zu, so dass Fehler in der Absorptionsmessung entstehen.
3) Die Dielektrizitätskonstante hängt vom Material ab. Wenn also der Durchmesser des kohlenstoffartigen Kerns der Teerteilchen durch Kondensation von Stoffen anwächst, wie es z.B. beim Übergang von der Vollast zum Leerlauf in Bild 5 von $D_o = 15$ nm auf $D = 25$ nm geschieht, so ändert sich ε. Das relative Volumen des Kondensats ist $\Delta V/V = (D^3 - D_o^3)/D^3 = 78\%$. Das Teilchen besteht also jetzt mehrheitlich anstatt aus Kohlenstoff aus Kondensat, d.h. man kann nicht annehmen, dass ε unabhängig vom Betriebszustand oder der Art der Verbrennungsmaschine ist.

Die Grenzen der optischen Messungen, überhaupt die Schwierigkeiten bei der Anwendung traditioneller Methoden, wurden z.B. von Stein[22] und Hardenberg und Albrecht[23] beschrieben. Sie sind auch in der enormen Instabilität der Verbrennungsaerosole begründet; es ist ja ohne weiteres klar, dass die Grösse und Form der Aggregate der Teerteilchen und die an ihnen adsorbierten Stoffe von der Temperatur der Umgebung und den Partialdrucken der Gaskomponenten wesentlich abhängen und vor allem beim Absetzen auf einem Filter nicht als konstant betrachtet werden dürfen.

Mit dem Konzept der fraktalen Dimension kann man Lösungen für die optischen Probleme finden, die sich aus der bizarren Form der Agglomerate der

[22] H.J. Stein, in Dieselmotortechnik, V. Essers ed., Techn. Akademie Esslingen, 1986.
[23] Horst Hardenberg und Hans Albrecht. Motortechn. Zeitschr. 48, p. 51 (1987).

Teerteilchen ergeben. Zufälliger Zusammenschluss von N primären kugelförmigen Teilchen zu Aggregaten der Masse M wird auch bei nicht aus der Verbrennung stammenden Aerosolen häufig beobachtet. Durch intermolekulare van-der-Waals-Kräfte haften die Teilchen aneinander beim ersten zufälligen Kontakt. Man erhält Aggregate von der trauben- oder kettenartigen Form, vgl. Bilder 1–4. Es muss für ein Aggregat gelten:

$$M = \text{const } N = \text{const}^* D^{d_f} \qquad (3)$$

Wenn das Aggregat kugelförmig ist, und D sein Durchmesser, so ist $d_f = 3$. Wenn das Aggregat sich aber auf einer Ebene zur dichtesten Packung zusammenschliesst, so ist $d_f = 2$. Wenn sich die primären Teilchen auf einer linearen Kette mit Länge D zusammenschliessen, so ist $d_f = 1$. Die Form des Agglomerates wird so durch seine fraktale Dimension d_f beschrieben. A. Schmidt-Ott[24] zeigte, wie man d_f für ein Aerosol aus Silberkugeln messen kann. Colbeck, Hardman und Harrison[25] führten Experimente an einem Verbrennungsaerosol durch. Sie fanden, dass die optischen Daten, die mit der Theorie der fraktalen Agglomerate berechnet werden, besser mit dem Experiment übereinstimmen als die nach der klassischen Mie-Theorie erwarteten. Ein wesentliches Ergebnis der Theorie der fraktalen Aggregate besagt, dass die optischen Eigenschaften nur sehr wenig von der Agglomeration abhängen, wenn $d_f < 2$ ist, also das Aggregat von einer dichten Kugelpackung weit entfernt ist. Das ist bei den Verbrennungsaerosolen der Fall, und abgesehen von einem konstanten Beitrag der Vielfachstreuung des Lichts absorbieren und streuen die primären Teerkugeln dann jede für sich, unabhängig vom Zusammenschluss im Aggregat. Das ist ein einfaches Konzept, das die Schwierigkeiten der Formbestimmung eliminiert und in die offizielle Russbestimmung Eingang finden sollte.

Was aber eigentlich an den Verbrennungsaerosolen interessiert, sind ja nicht die optischen Daten, sondern vor allem die Anzahl und der Grad der Giftigkeit derjenigen Teilchen und Aggregate, die in der Lunge und den Bronchien abgelagert werden können. Es handelt sich also im Zusammenhang mit den Verbrennungsaerosolen vor allem um die Bestimmung der auf den lungengängigen Teilchen angelagerten polyzyklischen Kohlenwasserstoffe.

Dazu kann man das Aerosol auf einem Filter niederschlagen und mit einem Lösungsmittel wie Methylenchlorid oder besser Toluol die lösliche organische Fraktion extrahieren. Diese wird dann mit Gaschromatographie oder Massenspektrometrie in ihre Bestandteile zerlegt und gemessen. Die Familie der PAHs ist am reichhaltigsten beim Teer der Kohle, wo bis zu 30 000 verschiedene Verbindungen vorkommen sollen. Die Abgase von Verbrennungsmaschinen sind weniger reichhaltig, und die mengenmässige Verteilung auf die verschiedenen Typen, das sogenannte PAH-Profil, ist erstaunlicherweise nahezu unabhängig von der Art des Brennstoffs, z. B. Benzin, Dieselöl und

[24] A. Schmidt-Ott. Appl. Phys. Lett. *52*, 954 (1988).

[25] I. Colbeck, E. J. Hardman, and Roy M. Harrison. J. Aerosol Sci. *20*, 765 (1989).

Holz. Sogar Polystirin und Polyvinylchlorid geben in der Pyrolyse etwa dieselben PAH-Profile wie die übrigen Brennstoffe[26]. Hingegen hängt die gesamte Menge der emittierten PAHs, pro kg verbranntem oder pyrolysiertem Material, sehr von den Bedingungen bei der Verbrennung oder Pyrolyse ab. Der Einfachheit halber wurde daher vorgeschlagen, die Häufigkeit eines als besonders mutagen erkannten Moleküls, z. B. die des Benzo[a]pyrens, als Mass für die Menge der gesamten karzinogenen Stoffgruppe der PAHs zu nehmen.

6 Der photoelektrische Nachweis der Teerteilchen

Wegen der Aufwendigkeit der direkten chemischen Analyse ist der viel einfachere photoelektrische Nachweis der Teerteilchen sehr interessant. Diese neuere Messtechnik kann etwa jede Sekunde einen Messwert liefern, welcher der gesamten auf den Teerteilchen adsorbierten PAH-Menge proportional ist. Das physikalische Prinzip beruht auf dem photoelektrischen Effekt. Die Luft oder allgemeiner das Gas, welches die Schwebeteilchen enthält, wird mit Licht bestrahlt. Die Wellenlänge des Lichts liegt im Ultravioletten, z. B. bei 250 nm. Die Energie des Lichtes reicht nicht aus, um die Gasmoleküle zu ionisieren. Absorbiert dagegen ein Schwebeteilchen ein solches UV-Quant, so kann es zur Emission eines Photoelektrons kommen. Die Photoelektronen thermalisieren durch Stösse mit den Gasmolekülen und können auf Grund ihrer raschen Diffusion und/oder durch Anlegen eines elektrischen Feldes aus dem Gas entfernt werden. Zurück bleiben positiv geladene Schwebeteilchen, die in einem Filter abgeschieden werden. Dadurch fliesst ein elektrischer Strom vom Filter ab, der nach entsprechender Verstärkung das Signal des photoelektrischen Aerosolsensors liefert[27].

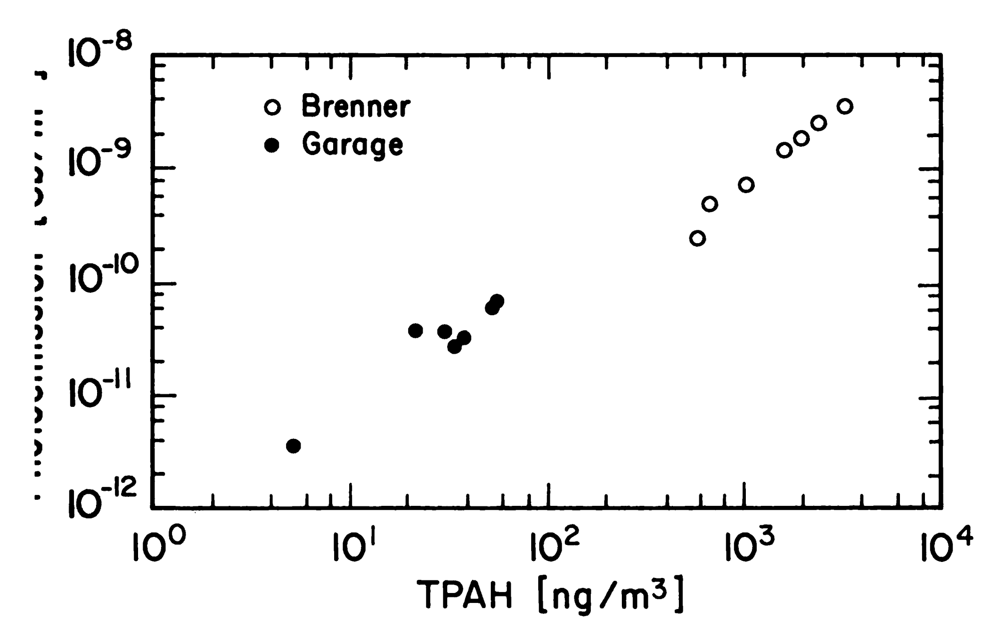
Mit der Photoemission können die Teerteilchen auch bei Anwesenheit anderer, nicht aus Verbrennungen stammender Schwebeteilchen materialspezifisch nachgewiesen werden. Es stellt sich nämlich heraus, dass in normaler Aussenluft die Teerteilchen bei weitem die effizientesten Photoemitter sind, und dass die Effizienz ganz wesentlich von den an der Oberfläche adsorbierten PAHs bestimmt wird.

Darüber hinaus werden mit dieser Methode ausschliesslich Teilchen oder Aggregate mit einem Durchmesser $D \leq 1\ \mu m$, also im wesentlichen nach Bild 6 die lungengängigen Teilchen, nachgewiesen. Das kommt daher, dass die Elektronen im Gas nach einer Strecke von der Grössenordnung der mittleren freien Weglänge thermalisieren. Sie beträgt etwa 1 µm bei Normaldruck. Ist D grösser als die Thermalisierungslänge, so befindet sich das Elektron noch in der Nähe des Teilchens und die Wahrscheinlichkeit ist sehr gross, dass es im Laufe der Diffusionsbewegung wieder vom Teilchen eingefangen wird, d. h. aber, dass grössere Teilchen nicht aufgeladen werden können.

[26] W. Schmidt, in Ref. 2, p. 149–164.
[27] H. Burtscher. Bull. Schweiz. Elektrotechn. Verein *80*, 1515 (1989).

Die Ansprechzeit des Aerosolsensors hängt von der Strömungsgeschwin-igkeit des die Teilchen tragenden Gases durch die beleuchtete Zone ab. Sie t typischerweise etwa 1 sec oder darunter. Dadurch können auch dynami-he Prozesse, z. B. Emissionsspitzen der Verbrennungsmaschinen, erfasst und rentuell durch entsprechende Regelung der Prozessleittechnik vermieden erden[27]. Die direkte chemische Analyse braucht dagegen viele Stunden Sam-elzeit, erlaubt also nicht die Erfassung der Dynamik.

Im Bild 8 werden die Messwerte eines photoelektrischen Aerosolsensors it der gaschromatographisch bestimmten Gesamtmenge an PAHs vergli-



ld 8 Die von einer Quecksilberniederdruckentladung von 4 Watt Lichtleistung bei einer ellenlänge von 253 nm im teilchenhaltigen Gas erzeugte elektrische Ladungsdichte (Cb/m^3) ist fgetragen gegen die totale Masse der teilchengebundenen polyzyklischen Aromaten TPAH g/m^3). TPAH wurde gaschromatographisch bestimmt durch Extraktion aus dem Filterrück-ind. Die Filterproben wurden einmal direkt im Abgas eines Brenners oder aus der Luft einer efgarage gewonnen. Das Signal der Photoemission ist über die Filterzeit gemittelt. Trotz der ır unterschiedlichen Aerosole und PAH-Profile der beiden Proben sieht man einen universel-ı linearen Zusammenhang der Anzeige des photoelektrischen Sensors mit der TPAH über 4 rössenordnungen.

g. 8 The density of the electrical charge (Cb/m^3) that was generated in the gas by the light om a low density Hg-resonant lamp of 4 Watts light output at 253 nm wavelength is plotted vs e total mass of particle bound polycyclic aromatic hydrocarbons (TPAH) in units of ng/m^3. PAH was determined by gaschromatography of the extract of a filter. The samples have been llected on the filter directly in the exhaust of an oil burner or in the air of an underground car ırk. The signal of the photoemission is averaged over the duration of the filtering. Despite of the ry different types of aerosols and PAH-profiles, a universal linear relationship is established tween the signal of the photoelectric sensor and the TPAH over 4 orders of magnitude.

chen[28]. Es handelt sich um eine Messung im Abgas der Ölheizung eines Einfamilienhauses, bei der durch Regulieren der Luftklappe diverse Russwerte im Bereich der Bararachzahlen 1–6 eingestellt wurden. Die anderen Messpunkte wurden in der Luft einer Tiefgarage erhalten. Die Schwebeteilchen wurden auf einem Glasfaserfilter niedergeschlagen, das anschliessend in Toluol zur Extraktion der PAHs gekocht wurde. Die PAH-Profile aus dem Ölbrennerabgas und der Garagenluft waren ziemlich unterschiedlich; im Ölbrennerabgas gibt es weniger Spezies als in der Tiefgarage. Das PAH-Profil der Tiefgarage gleicht dem schon früher auch von Grimmer und Mitarbeitern an Auspuffgasen der Automobile gefundenen[29]; PAH-Massen $\geq$ 252 machen 85% der gesamten PAH-Masse aus. Die schweren PAHs sind besonders wichtig, weil sie mehrere starke Karzinogene wie z. B. Benzo[a]pyren (252) und Dibenz(a,h)anthrazen (278) enthalten. Im Falle des Abgases der Ölheizung werden bei verschiedenen Russzahlen auch etwas unterschiedliche PAH-Profile beobachtet, obwohl die Gesamtmasse der PAHs innerhalb der Messgenauigkeit linear mit der Russzahl zunimmt.

Man sieht, dass trotz der enorm unterschiedlichen Agglomeration der Teerteilchen bei Variation der Luftzufuhr des Ölbrenners ein linearer Zusammenhang zwischen der gaschromatographisch bestimmten Gesamtmasse der PAH und dem Signal des photoelektrischen Aerosolsensors besteht. Noch erstaunlicher ist das ebenfalls aus Bild 8 zu entnehmende Ergebnis, dass auch bei den Verbrennungsaerosolen der Tiefgarage derselbe lineare Zusammenhang des photoelektrischen Signals mit der totalen Masse der PAHs besteht. Sogar die Eichkonstante kann für die beiden ganz verschiedenen Aerosoltypen als praktisch gleich angesehen werden, wenn man sich die Unsicherheiten und mögliche Messfehler bei der Bestimmung so kleiner Substanzmengen vor Augen hält. Das sehr einfache Ergebnis von Bild 8 kann man auf 3 grundlegende physikalische Eigenschaften der Photoemission an Verbrennungsaerosolen zurückführen:

1) Die photoelektrische Aufladung pro Teerteilchen ist unabhängig von der Agglomeration.
2) Die photoelektrische Aufladung ist viel stärker, wenn PAH an der Oberfläche adsorbiert sind.
3) Die photoelektrische Aufladung ist proportional zur Masse der adsorbierten PAH.

Zur Erklärung betrachtet man den photoelektrischen Strom i_{ph} eines mit Lichtquanten der Energie $h\nu$ und der Stromdichte $j_{h\nu}$ bestrahlten Objektes der Fläche F:

$$i_{ph} = j_{h\nu} \cdot F\,\alpha \cdot k(h\nu - h\nu_o)^m \tag{4}$$

[28] Stephen Mc Dow, Walter Giger, Heinz Burtscher, Andreas Schmidt-Ott, and H.C. Siegmann, Atmosph. Evironment, in print.

[29] G. Grimmer, in Handbook of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. A. Byoerseth ed., Dekker, New York, Basel, 1985.

α ist die optische Absorption, k eine Konstante, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass ein Elektron, das ein Lichtquant absorbiert hat, die Oberfläche des Objektes erreicht, $h\nu_0$ die minimale Quantenenergie, bei der Elektronenaustritt beobachtet wird und m ein empirischer Exponent. Bei Metallen ist m = 2 nach der bekannten Theorie von Fowler-Nordheim.

Man sieht, dass 1) aus den optischen Versuchen[25] folgt. Danach ist α bei Russteilchen, die eine fraktale Dimension $d_f \leq 2$ haben, einfach proportional zur Anzahl der Teerteilchen, unabhängig wie viele Teerteilchen im Agglomerat sind. Nach Gl.(4) wird dann i_{ph} proportional zur Anzahl der Teerteilchen, unabhängig von der Grösse der Agglomerate. Die Eigenschaft 2) zeigt sich in Modellversuchen: Man kann z. B. in einer Funkenentladung Kohlenstoffteilchen mit D = 20 nm herstellen und darauf ein PAH, z. B. das fünfringige Perylen, adsorbieren. Gleichzeitig mit dem Anwachsen des Teilchendurchmessers D durch Adsorption des Perylens beobachtet man eine starke Zunahme von i_{ph} und zwar schon bei Zunahmen von D, die noch unterhalb der Dicke einer einzigen Lage des adsorbierten Moleküls liegen[30]. Wahrscheinlich sind hier zwei verschiedene Mechanismen der Verstärkung von i_{ph} wirksam:

i) Die Erniedrigung der photoelektrischen Schwelle $h\nu_0$ an der Stelle, an der ein PAH-Molekül adsorbiert wurde,

ii) eine verstärkte Absorption α des Lichtes in der Nähe der Oberfläche. Es ist bekannt, dass PAH-Moleküle starke Fluoreszenz in der Nähe der Energie der Lichtquanten von ~ 250 nm zeigen. Die Absorption beruht auf elektronischen Übergängen zwischen Zuständen des aromatischen Rings. In der Gasphase würde das Molekül durch Fluoreszenzemission eines Lichtquantes wieder in den Grundzustand zurückkehren. Wenn das Molekül dagegen auf der Oberfläche eines Teerteilchens sitzt, ist die Schwelle $h\nu_0$ entsprechend erniedrigt, so dass anstatt des Lichtquants nun ein Elektron emittiert werden kann. Das an der Oberfläche adsorbierte PAH-Molekül mit den aromatischen Ringen bewirkt also als Antenne eine verstärkte Lichtabsorption α, die noch zusätzlich an der Oberfläche lokalisiert ist. Dadurch wird die Austrittswahrscheinlichkeit k der Photoelektronen erhöht, was nach Gl.(4) zur potenzierten Erhöhung von i_{ph} führt.

Die dritte und letzte Beobachtung der Proportionalität der gesamten Masse der PAH zum Strom des Aerosolsensors folgt auch aus Gl.(4). Aus den Modellversuchen mit künstlich beschichteten Oberflächen hat man nämlich gelernt, dass bei der hier vorhandenen schwachen Bedeckung von weniger als einer Lage Molekülen die PAHs flach auf der Oberfläche der Schwebeteilchen liegen. Je nach Unterlage emittiert mindestens bei einigen repräsentativen PAHs die bedeckte Oberfläche viel mehr Elektronen als die unbedeckte. Folglich ist i_{ph} dann proportional zur bedeckten Fläche F und somit zur Anzahl der Moleküle. Tatsächlich wurde die Proportionalität des Stromes des Aerosolsensors zur gesamten Masse der PAH auch von R. Niessner und Mit-

[30] H. Burtscher und A. Schmidt-Ott. Aerosols, Formation and Reactivity, p. 833. Pergamon Journals Ltd., G.G., 1986.

arbeitern an den verschiedensten künstlichen Aerosolen[31,32] am Zigarettenrauch[33] und bei Abgasen der Sondermüllverbrennung[34] festgestellt.

Abschliessend soll noch erwähnt sein, dass die Leuchtdichte $j_{h\nu}$, mit der das Aerosol zur Messung bestrahlt wird, genügend schwach sein muss, so dass zweifache Emission eines Elektrons aus einem primären Teerteilchen unwahrscheinlich ist. Dann kann man die grössenabhängige elektrostatische Erhöhung der Schwelle $h\nu_0$ nach der ersten Aufladung des Teilchens vernachlässigen.

Der photoelektrische Aerosolsensor ist also ein ideales Mittel zum Nachweis und zur Beurteilung von Verbrennungsaerosolen. Man kann ihn zur Diagnose und Regelung von Verbrennungsmaschinen und zur Beurteilung der Luftqualität z.B. in Arbeitsräumen oder auch Strassenverkehrstunnels einsetzen[27]. Man kann auch sehr leicht einige wichtige Beobachtungen über Teerteilchen machen, z.B. dass gut eingestellte Ölheizungen praktisch nichts immittieren, oder dass ein Auto mit Katalysator rund 10mal weniger partikelgebundene PAHs erzeugt als ein Auto ohne Katalysator. Auch die Desorptionstemperatur der PAHs von den Teerteilchen kann man durch Heizen leicht bestimmen, weil der Photostrom von den nackten Teerteilchen viel schwächer ist. Man kann sich ferner einfach überzeugen, dass die Nase die Teerteilchen nicht zurückhalten kann. Zudem werden wichtige Vorgänge in der Atmosphäre direkt beobachtbar, z.B. die Degradation der PAHs bei Sonne, oder die Anreicherung der Teerteilchen in der Inversionsschicht[18]. Die Dosis an partikelgebundenen PAHs im Strassenverkehr erweist sich als durchaus vergleichbar mit der Dosis beim Rauchen einiger Zigaretten pro Tag[35]. Bei Dieselmotoren sieht man, dass die Produktion an PAH-beladenen Teerteilchen wesentlich grösser als beim Ottomotor ist. Es bleibt zu hoffen, dass der Gesetzgeber möglichst bald eine lufthygienisch relevante Vorschrift zur Beurteilung der primären Verbrennungsaerosole erlässt.

7 Abschliessende Bemerkungen

Die Verbrennungsaerosole stammen in unseren Gegenden hauptsächlich aus dem motorisierten Individualverkehr und zu einem geringeren Teil aus schlecht eingestellten oder mit ungünstigen Brennstoffen betriebenen Hausheizungen, also aus Verbrennungsmaschinen, die jeder benützt. Abgesehen vom Tabakrauch ist die Reinhaltung der Atemluft derzeit hauptsächlich durch den unbegreiflichen Missbrauch des Automobils begrenzt. Obwohl der

[31] Reinhard Niessner, Wilfried Robes, and Peter Wilbring. Anal. Chem. *61*, 320 (1989).
[32] Reinhard Niessner and Peter Wilbring. Anal. Chem. *61*, 708 (1989).
[33] Reinhard Niessner and Gudrun Walenzik. Fresenius Z. Anal. Chem. *333*, 129 (1989).
[34] H. Hackfort, A. Zajc, E. Uhlig, und R. Niessner. Tagung: Entsorgung von Sonderabfällen durch Verbrennung, Baden-Baden, 4.–6. 12. 1989.
[35] H.C. Siegmann. Universitas *40*, 1057 (1985).

Anteil der Motorfahrzeuge am totalen Energieverbrauch z. B. in Zürich im Jahre 1988 nur 10% betrug, war die Vergiftung der Luft mit CO zu 91%, mit NO_x zu 55%, mit Kohlenwasserstoffen zu 82% und mit Blei zu 79% auf den motorisierten Individualverkehr zurückzuführen (Umweltbericht 1990 der Stadt Zürich). Lediglich beim NO_x mit 41 % haben auch die Feuerungen einen merklichen Anteil. Alle Anstrengungen für Verbesserungen scheitern daran, dass viele Menschen das Automobil in seiner heutigen Form als absolut notwendig erachten; bekanntlich nimmt man neben der Vergiftung der Luft auch eine Unzahl von Verkehrsopfern, enormen Bodenverbrauch für Strassen und Parkplätze, barbarischen Lärm und riesige persönliche Unkosten in Kauf. Mit einer Reihe von bereits jetzt verfügbaren technischen Lösungen wie z. B. zweckmässigeren Motorfahrzeugen mit kleiner Leistung und Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene lässt sich schon heute eine wesentliche Verbesserung der Luftqualität erreichen, ohne dass die Annehmlichkeiten unserer Zivilisation aufgegeben werden müssen. Grundlage zusätzlicher Verbesserungen kann nur eine möglichst präzise messtechnische Erfassung der primären und sekundären Verbrennungsaerosole sein. Mehr als in der Vergangenheit muss die Qualität der Luft nach ihrem Gehalt an lungengängigen Partikeln und den auf ihrer Oberfläche adsorbierten Stoffen beurteilt werden. Die Sichtbarmachung der primären Teerteilchen und ihrer Agglomerate im Elektronenmikroskop, die Beschreibung der bizarren Formen der Aggregate mit dem Konzept der fraktalen Dimension und die einfache Messung der Adsorption und Desorption von Molekülen auf der Oberfläche der Russpartikel mit dem photoelektrischen Effekt haben zu einer besseren Erfassbarkeit auch des messtechnisch bisher schwierigen Russes geführt. Damit sollte der Gesetzgeber endlich in der Lage sein, angemessenere Vorschriften zu erlassen, die gerechtfertigten, neueren Ansprüchen genügen zu können.

Dr. Heinz Burtscher und Dr. Andreas Schmidt-Ott möchte ich für viele wertvolle Diskussionen, Markus Ammann, Anna Leonardi, Dietmar Steiner und Roland Wessicken auch für die Überlassung von Forschungsergebnissen vor der Publikation sehr danken[36].

[36] Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. H.C. Siegmann, Laboratorium für Festkörperphysik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Buchbesprechungen

Antiquariats-Katalog 68: Mathematics – Minor Writings; Part I: A–H (G. Renner, Antiquariat & Buchhandlung, Tailfingen BRD)

Dieser ungewöhnliche Antiquariats-Katalog verdient Beachtung. Er enthält ausschliesslich «kleine» Publikationen, d.h. Sonderabdrucke aus wissenschaftlichen Zeitschriften und Sammelwerken, Dissertationen usw., aus der Zeit um 1900 bis in die sechziger Jahre. Es handelt sich nicht nur um Mathematik, sondern auch um Physik und Astronomie. Die anderweitig zum Teil schwer auffindbaren Arbeiten dürften für den aktiven Forscher, der auf Originalquellen zurückgreifen will, und für den Wissenschaftshistoriker von Interesse sein. Der Katalog ist in sorgfältiger Weise alphabetisch zusammengestellt und enthält Autorennamen von A bis H. Ein zweiter Teil I bis Z ist für Ende 1990 in Aussicht gestellt; er soll dann auch ein Gesamtregister enthalten.

Beno Eckmann

Manfred Achilles: Historische Versuche der Physik. Funktionsfähig nachgebaut. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Springer-Verlag, 1989, XI, 153 S., DM 39,80.

Grundlage des vorliegenden Werkes bot die Ausstellung «Historische Versuche – funktionsfähig nachgebaut», die aus Anlass der 51. Physikertagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 1987 an der Technischen Universität Berlin gezeigt wurde. Die Gestaltung der Ausstellung besorgte das «Institut für Fachdidaktik Physik und Lehrerbildung», wo der Autor als Professor wirkt. Die Ausstellung, die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurde, fand lebhaftes Echo, und Besucher regten an, die gezeigten Versuche einem grösseren Kreis bekannt zu machen. Diesem Anliegen verdankt das vorliegende, ausführlich gestaltete Buch seine Entstehung, es wendet sich an Physiker und Wissenschaftshistoriker, denen das Experimentieren fern steht, an Physiklehrer, Ingenieure, Techniker und interessierte Laien. In 19 Kapiteln historischer Experimentalphysik von Newtowns Experimentum crucis bis zu E. Müllers Feldelektronenmikroskop werden 21 Physikerergobiographien und 25 historische Versuche vorgestellt. Alle Kapitel sind einheitlich gestaltet. Sie beginnen mit einer kurzen Biographie des Physikers, in der Kindheit, Schulbildung, Jugend und Studium besonders berücksichtigt werden. Im zweiten Abschnitt gibt der Autor eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Leistungen des Physikers, wobei der theoretische Hintergrund der nachfolgend besprochenen Versuche eingehender erläutert wird. Der dritte Abschnitt bringt die «klassischen» Experimente, deren Resultate durch Photographien und Messergebnisse belegt werden. Der Autor legt bewusst keinen Wert auf materialmässig antike Anordnung der Versuche, jedoch grossen Wert auf die Rekonstruktion der ursprünglichen Funktion. Auf Drechslerarbeiten und Zierat wurde also verzichtet, moderne Versorgungsgeräte fanden, sofern sie das Experiment nicht verfälschen, Eingang. Die für das theoretische Verständnis der einzelnen Versuche notwendigen Kenntnisse werden, und dies wird vom Autor betont, nicht im Detail vermittelt. Hier muss der Leser auf die einschlägigen Lehrbücher der Physik zurückgreifen. Ohne ein solches Lehrbuch bleibt dem interessierten Laien Wesentliches verschlossen. Dem Autor und seinen Mitarbeitern ist es gelungen, etwas von der Faszination dieser klassischen Versuche und ihrer Schöpfer weiterzugeben und zu zeigen, dass der historische, besonders der historisch-experimentelle Zugang zur Physik nicht nur ein gangbarer, sondern ein besonders anregender ist. Für eine spätere Auflage, die dem Buch zu wünschen ist, sollte die Erläuterung der in den Skizzen verwendeten Symbole vervollständigt werden.

Thomas Böni

rteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/4*: 221–238

ie Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: emische Aspekte

lf Grauer, Paul-Scherrer-Institut, Villigen

Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktiven Abfall basiert auf einem gestaffelten System technischen und natürlichen Barrieren. Die Abfälle aus der Aufarbeitung der Brennelemente den in Glas fixiert und in Stahlbehälter mit einer Wanddicke von 25 cm eingeschweisst. Die erstollen werden mit quellfähigem Bentonit-Ton verfüllt. Diese etwa meterstarke Verfüllung t wegen ihrer geringen Wasserdurchlässigkeit und der guten Sorptionseigenschaften eine effite Transportbarriere dar, die nur von sehr langlebigen Nukliden überwunden werden kann. ige davon sind im Grundwasser schwerlöslich, und die meisten werden auf ihrem Weg durch Wirtgestein und die darüberliegenden Sedimentschichten durch Adsorption zurückgehalten. Nuklide werden auf ihrem Transport durch Matrixdiffusion verzögert.
Sicherheitsanalysen haben nachzuweisen, dass die aus der Nuklidfreisetzung aus einem Endr resultierende Strahlenexposition das behördlich festgelegte Schutzziel nicht überschreitet. Absicherung solcher Analysen ist es notwendig, das Langzeitverhalten der technischen Baren und den Chemismus der Radionuklide auf dem potentiellen Migrationspfad zu kennen. ei genügt eine phänomenologische Beschreibung nicht; erforderlich ist das Verständnis der vanten Reaktionsmechanismen.

disposal of highly radioactive wastes: chemical aspects

safety of the storage of highly radioactive wastes relies on a system of sequential technical natural barriers. Wastes from reprocessing of fuel elements are immobilised in glass and the s is embedded in steel canisters of 25 cm wall thickness. The disposal tunnels are backfilled swelling bentonite clay. The backfill has approximately one meter thickness and represents fficient transport barrier because of its low hydraulic conductivity and good sorption proper- Very long-lived radionuclides, only, survive transport in the backfill. Some of these have low bilities in groundwater. For most of them migration through host rock and overlaying sediits is retarded by adsorption. For all of them matrix diffusion contributes to retardation. Safety assessments have to prove that dose exposition resulting from disposal does not exceed regulatory limit. For a reliable safety analysis knowledge of long-term performance of techni- barriers and chemical behaviour of radionuclides along a potential migration path is neces- . In this, a phenomenological description is insufficient; required is the understanding of vant reaction mechanisms.

Iochradioaktive Abfälle aus Kernkraftwerken

m Betrieb eines Kernkraftwerks der 1000-Megawatt-Klasse werden pro ır rund 30 Tonnen Brennstoff ausgewechselt. Die verbrauchten Brennelente enthalten etwa 1100 kg Spaltprodukte sowie Transurane, die aus den anisotopen 235 und 238 durch Neutroneneinfang und anschliessenden β-fall gebildet werden. Auf diese Art entstehen Neptunium-237 und das ltbare Plutonium-239. Durch eine Folge weiterer Kernprozesse bilden sich lere Isotope dieser beiden Elemente sowie Americium und Curium. Aus ein 1000-MW-Reaktor werden pro Jahr etwa 270 kg Plutonium und 18 kg ptunium, Americium und Curium ausgetragen.

Die verbrauchten Brennelemente der schweizerischen Kernkraftwerke werden in ausländischen Anlagen aufgearbeitet, um die wieder verwertbaren Elemente Uran und Plutonium von den hochradioaktiven Spaltprodukten und den übrigen Transuranen abzutrennen. In diesem Abfall verbleiben auch Reste von nicht abgetrenntem Uran und Plutonium sowie Korrosionsprodukte und Anteile von Prozesschemikalien. Er besteht aus einem Gemisch von etwa 35 verschiedenen chemischen Elementen, und er enthält in konzentrierter Form rund 99% der aus dem Reaktor ausgebrachten Radioaktivität.

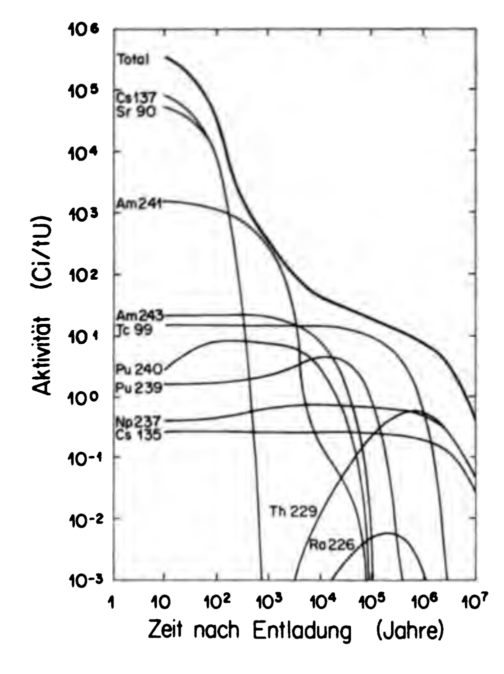


Bild 1 Die Abnahme der Radioaktivität von hochaktivem Abfall. Basis: 1 Tonne Uran; Anreicherung: 3,1% U-235; Abbrand: 33000 MWd/t; Spezifische Leistung: 34,4 MW/t; Aufarbeitung: 10 Jahre nach Entnahme aus dem Reaktor (nach KBS, 1978).

Fig. 1 Decrease of radioactivity in high-level waste. Basis: 1 ton of uranium; enrichment: 3.1% U-235; burnup: 33,000 MWd/t; specific power; 34.4 MW/t; reprocessing: 10 years after discharge from the reactor.

Bild 1 zeigt die wichtigsten aktivitätsbestimmenden Nuklide und deren Zerfall. Die β-Aktivität aus dem Zerfall von Strontium-90 und Caesium-137 ist nach einigen hundert Jahren weitgehend abgeklungen. Bis zu etwa 3000 Jahren wird die Aktivität des Abfalls durch den α-Zerfall von Americium-241 bestimmt. Die Gesamtaktivität ist in dieser Zeit auf weniger als ein Promille des Ausgangswertes abgesunken. Die Toxizität des Abfalls ist jetzt vergleichbar mit derjenigen der entsprechenden Menge Natururan, die zur Herstellung des Brennstoffs benötigt wurde. Der weitere Zerfall erfolgt nun extrem langsam.

2 Die Endlagerung des hochaktiven Abfalls

Die verfestigten hochradioaktiven Abfälle müssen wegen ihrer hohen Toxizität in einem Endlager von der Biosphäre isoliert werden. Der Schutz von

Mensch und Umwelt vor der Schädigung durch ionisierende Strahlung wurde von den Behörden in einem Schutzziel quantifiziert (HSK 1980):

«Radionuklide, die als Folge von realistischerweise anzunehmenden Vorgängen und Ereignissen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen, sollen zu keiner Zeit zu Individualdosen führen, die 10 mrem (0,1 mSv) pro Jahr überschreiten.»

Gleichzeitig wird verlangt, dass ein Endlager so auszulegen ist, dass nach dem Verschluss auf Sicherheits- und Überwachungsmassnahmen verzichtet werden kann.

Im «Projekt Gewähr 1985» hat die nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) ein Endlagerkonzept für hochaktive Abfälle vorgelegt (Nagra 1985/01–05). Das Schutzziel soll durch ein System von technischen und natürlichen Freisetzungs- und Verzögerungsbarrieren eingehalten werden. Durch den Bau des Endlagers in einer Tiefe von 1000 bis 1500 m wird erreicht, dass die radioaktiven Stoffe nur mit Wasser bis zur Oberfläche gelangen können.

Bild 2 zeigt schematisch das System der technischen Barrieren in einem Endlagertunnel. Der in Glas verfestigte Abfall ist von einem dickwandigen Stahlbehälter umgeben, der während mindestens 1000 Jahren einen absoluten

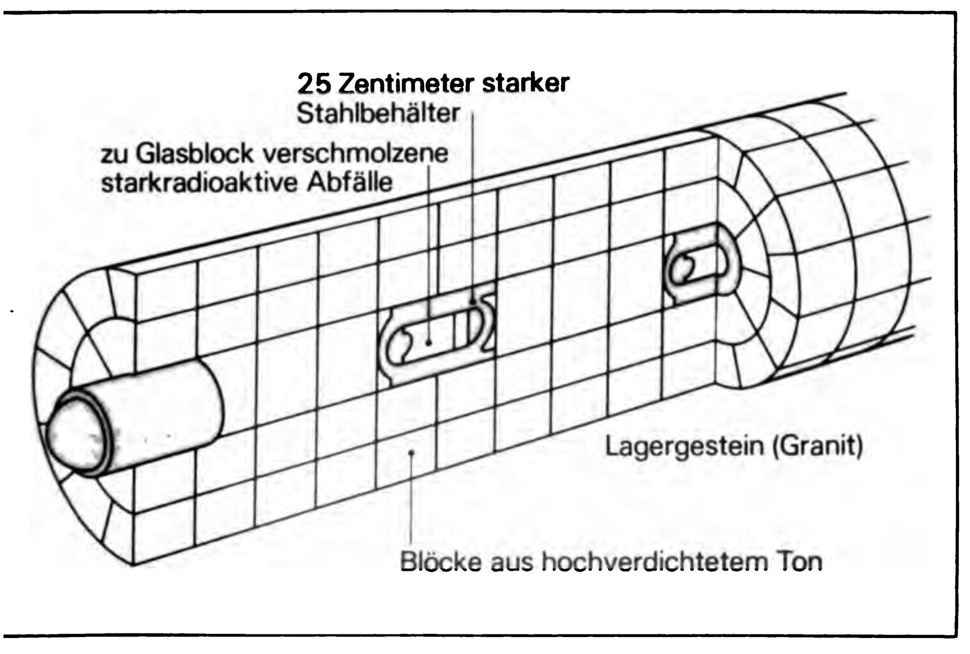


Bild 2 Schnittzeichnung durch einen Endlagerstollen (Durchmesser: 3,7 m) mit eingelagertem hochaktivem Abfall und den technischen Sicherheits-Barrieren (Bild: Nagra).

Fig. 2 Sectional drawing of a disposal tunnel (diameter: 3.7 m) with emplaced high-level radioactive waste and the system of technical safety barriers.

Einschluss zu gewährleisten hat. Nach dem Versagen des Behälters wirkt das Glas als Freisetzungsbarriere; durch seine langsame Reaktion mit Wasser wird die Nuklidfreisetzung begrenzt. Die dritte Barriere bildet die Tunnelverfüllung mit Bentonit, einem quellfähigen Ton, der bei Wasserzutritt das Endlager abdichtet. Für die aus dem Glas freigesetzten Stoffe wirkt die Verfüllung primär als hydraulische Transportbarriere. Für zahlreiche Nuklide wird der Durchbruch durch die Adsorption am Ton weiter verzögert.

Das Wirtgestein und die überdeckenden Sedimente mit einer Mächtigkeit von mehreren hundert Metern bilden die natürlichen geologischen Barrieren. Das Endlager soll in geologisch stabilem Gestein mit möglichst kleinen Wasserflüssen und -fliessgeschwindigkeiten angelegt werden (beispielsweise im Granit der Nordschweiz). Dadurch wird der Wasserzutritt zum Abfall begrenzt, und die radioaktiven Stoffe werden auf dem Weg zur Erdoberfläche durch Adsorption und durch Diffusion in den Porenraum der Gesteinsmatrix (Matrix-Diffusion) verzögert. Diese Mechanismen sind auch in der Überdekkung des Wirtgesteins wirksam. Ein grosser Wasserfluss in endlagerfernen Aquiferen sorgt ausserdem für eine starke Verdünnung von potentiell kontaminiertem Grundwasser auf dem Weg zur Biosphäre.

3 Die Sicherheitsanalyse und die Rolle der Chemie

Die Sicherheitsanalyse für ein Endlager hat nachzuweisen, dass die aus der Nuklidfreisetzung aus einem Endlager resultierende Strahlenexposition das behördlich festgelegte Schutzziel nicht überschreitet. Wegen der langen Zeiträume, die dabei zu berücksichtigen sind, ist ein direkter experimenteller Sicherheitsnachweis nicht möglich. Entsprechende Studien müssen sich deshalb auf Modelle der massgebenden physikalischen, chemischen und geologischen Vorgänge abstützen.

Der wahrscheinlichste Fall für die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager ist ihr Transport durch das Grundwasser. Bild 3 zeigt die Modellkette für die Analyse dieses Szenariums: Das Grundwasser gelangt in das Endlager, korrodiert den Behälter und reagiert anschliessend mit dem verfestigten Abfall. Durch das Verfüllmaterial gelangen die Nuklide in die Geosphäre und möglicherweise schliesslich an die Erdoberfläche, wo sie über Nahrungsketten den Menschen erreichen.

Diese Modelle benötigen eine Fülle an chemischer Information, z. B. über die Korrosionsgeschwindigkeit des Behälters und des verfestigten Abfalls und über die Nuklidsorption an den verschiedenen Festphasen des potentiellen Migrationspfads. Dabei ist es wichtig, dass die Zahlenwerte, die in die Rechnung eingehen, solid abgesichert sind. Dies setzt ein detailliertes Verständnis der massgebenden Reaktionen und ihrer Mechanismen voraus. Vom Chemiker werden aber auch Aussagen erwartet, die nicht direkt in die Modellrechnung eingehen. Er hat beispielsweise bei der Auswahl der technischen Barrieren mitzuwirken oder die Langzeitstabilität des Verfüllmaterials zu beurteilen.

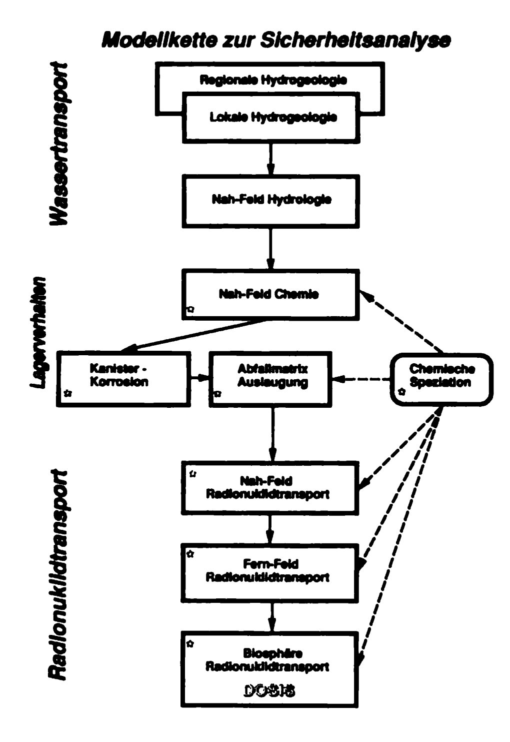


Bild 3 Modellkette für das Grundwasserszenarium der Sicherheitsanalyse eines Endlagers für hochaktiven Abfall. Die mit einem Stern bezeichneten Modellblöcke werden am PSI im Rahmen des «Programms Entsorgung» bearbeitet.

Fig. 3 Model chain for the groundwater scenario in repository safety analyses. The asterisks indicate model blocks where PSI has a strong activity within its Waste Management Program.

Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, braucht es zur Beschreibung eines Endlagers keine «neue» Chemie. Zwar ist diese Chemie ausserordentlich vielfältig, und sie erfordert Kenntnisse aus verschiedenen Spezialbereichen wie Korrosionschemie, aquatische Grenzflächenchemie und Lösungschemie. Dabei kann man sich aber auf bewährte Grundlagen abstützen und auch Konzepte aus Nachbargebieten adaptieren.

Neu ist allenfalls der Zeithorizont, mit dem der Chemiker hier konfrontiert wird. Laborexperimente sind zeitlich notwendigerweise begrenzt, und die Zuverlässigkeit ihrer Übertragung im Rahmen des Sicherheitsnachweises muss geprüft werden. Hier kann aber das Studium natürlicher geochemischer Prozesse weiterhelfen. Auch archäologische Metall- und Glasfunde bieten sich an, um die zeitliche Extrapolation von Laboruntersuchungen abzusichern. Die Untersuchung natürlicher Analogien bildet deshalb einen wichtigen Bestandteil für die Beurteilung des Endlagerverhaltens (N.A. Chapman et al., 1984; B. Côme, N.A. Chapman, 1987).

Für den Aussenstehenden ist es nicht einfach, sich einen Überblick über den gesamten Themenkreis zu verschaffen. Die Folge davon ist ein tiefes Misstrauen gegenüber den Sicherheitsaspekten eines Endlagers, das nur durch eine intensive Beschäftigung mit der Materie abgebaut werden kann. Dem steht aber im Weg, dass die Spezialliteratur über die chemischen Aspekte der Endlagerung ausserordentlich umfangreich ist. Weil es sich dabei meist

um «graue» Literatur handelt, ist sie auch nicht immer leicht zugänglich. Zur vertieften Orientierung liegen aber allgemeinverständliche Bücher vor, die das Thema der Endlagerung auf naturwissenschaftlicher Grundlage behandeln (N.A. Chapman, I.G. McKinley, 1987; A.G. Herrmann, 1983; A.G. Milnes, 1985; PAGIS, 1988).

4 Behältermaterialien

Der Behälter für den verfestigten Abfall soll nach dem Endlagerkonzept der Nagra so ausgelegt werden, dass er für mindestens 1000 Jahre eine Absolutbarriere gegen die Freisetzung von Radionukliden darstellt. Diese Forderung ergibt sich aus der Wärmeproduktion des Abfalls, die nach diesem Zeitraum weitgehend abgeklungen ist. Ausserdem sind die relativ kurzlebigen Nuklide Strontium-90 und Caesium-137 praktisch vollständig zerfallen (Bild 1). Bei einem Gebirgsdruck von etwa 300 bar muss ein solcher Behälter naturgemäss dickwandig sein. Dies ergibt ausserdem eine gute Strahlenabschirmung, so dass korrosionsfördernde Radiolyseprozesse im umgebenden Wasser bedeutungslos werden.

Vom korrosionschemischen Standpunkt aus ergeben sich für die Materialwahl die folgenden Möglichkeiten (R. Grauer, 1984 b):

- Metalle, die unter den reduzierenden Endlagerbedingungen thermodynamisch stabil sind (Kupfer)
- Passive Metalle wie Titan oder Nickellegierungen, die dank einer reaktionsträgen dünnen Oxidschicht eine ausserordentlich kleine Korrosionsgeschwindigkeit haben
- Metalle, die unter Endlagerbedingungen in beschränktem Ausmass korrodieren. Der Korrosion wird durch einen entsprechenden Wandstärkenzuschlag Rechnung getragen (Stahl oder Gusseisen).

Kupfer scheidet wegen seiner geringen mechanischen Festigkeit aus; das Material würde unter dem Gebirgsdruck fliessen. Bei passiven Metallen ist es vielfach nicht möglich, Behälter mit der erforderlichen Wanddicke herzustellen. Ausserdem neigen sie bei kleinem durchschnittlichem Flächenabtrag zu selektiven Korrosionsarten (Spannungsrisskorrosion, Lochkorrosion), die zu einem raschen Behälterversagen führen können und deren Eintreten schwierig zu prognostizieren ist.

Für das schweizerische Endlagerkonzept wurde deshalb die dritte Möglichkeit gewählt: Es ist ein verschweisster Stahlbehälter mit einer Wandstärke von 25 cm vorgesehen, die eine Korrosionsreserve von 5 cm beinhaltet. Nach dem Verschluss des Endlagers und nach einem Wasserzutritt wird zunächst der eingeschlossene Sauerstoff durch eine Korrosionsreaktion zu Eisen(III)-Verbindungen verbraucht. Anschliessend erfolgt die Korrosion unter anaeroben Bedingungen unter der Bildung von Magnetit:

$$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4\ H_2.$$

Dieses Korrosionsprodukt stellt einen erwünschten Redoxpuffer dar, der sich günstig auf den Rückhalt der aus dem Abfallglas freigesetzten Actiniden auswirkt: Uran, Plutonium und Neptunium werden zur Oxidationszahl IV reduziert und deshalb stärker zurückgehalten als in den Oxidationszahlen V und VI.

Der Sicherheitszuschlag von 5 cm ist ein konservativer Wert; unter Endlagerbedingungen ist realistisch mit einer Korrosionsrate von etwa 10 µm pro Jahr zu rechnen. Dieser Wert ist mehrfach abgesichert. Er ergibt sich aus Laboruntersuchungen, die unter simulierten Endlagerbedingungen in kompaktiertem Bentonit durchgeführt worden sind (J. P. Simpson, 1984). Ausserdem ind Publikationen über das Korrosionsverhalten von Stahl und Eisen in auerstofffreien Salzlösungen bei erhöhter Temperatur und Befunde an Heisswassersystemen beigezogen worden. Dazu liegt eine etwa zweihundertjährige echnische Erfahrung vor. Schlüsse über das Langzeitverhalten und die Angriffsform lassen sich aus dem Zustand archäologischer Funde herleiten. Dies lles ist nicht nur eine Akkumulation empirischer Einzeldaten. Ein solides heoretisches Fundament trägt dazu bei, all diese Befunde zu verstehen und niteinander zu verknüpfen. So entsteht ein gut abgerundetes Bild, und es lässt ich eine gesicherte Prognose über das Korrosionsverhalten des Behälters im Endlager stellen.

Die Verfestigungsmatrix

.1 Weshalb Glas?

Die wichtigsten Anforderungen, die an eine Verfestigungsmatrix für hochaktiven Abfall gestellt werden müssen, sind

- gute chemische Beständigkeit
- hohes Abfallaufnahmevermögen
- Unempfindlichkeit gegen schwankende Abfallzusammensetzung
- mechanische Stabilität
- thermische Beständigkeit (Zerfallswärme)
- Unempfindlichkeit gegen radioaktive Strahlung
- sichere und wirtschaftliche Herstellungstechnologie.

Aus diesen Forderungen ergibt sich, dass nur eine mineralische und waserfreie Matrix in Frage kommt. Andere Materialien, wie etwa Zement oder organische Polymere, würden wegen der hohen spezifischen Anfangsaktivität les Abfalls radiolytisch oder thermisch zerstört.

Zahlreiche kristalline Oxide, wie z. B. Titanoxid oder Perowskit ($CaTiO_3$), ind gegen wässrige Lösungen ausserordentlich inert und passen auch aus anleren Gründen gut in das Anforderungsprofil. Erinnert man sich aber daran, lass die Aufgabe der Abfallverfestigung darin besteht, etwa 35 verschiedene Elemente mit bestimmten Ionenradien und Koordinationszahlen (Bild 4) auf estimmten Gitterplätzen unterzubringen, so zeigt sich, dass aus kristallche-

mischen Gründen nur eine mehrphasige Oxidkeramik in der Lage ist, sämtliche Ionen aufzunehmen (R. Grauer 1984 a). Aus strukturchemischen Gründen sind Gläser als Verfestigungsmatrix besser geeignet: Im amorphen und elastischen Glas-Netzwerk können sich die einzelnen Abfallelemente mit ihren unterschiedlichen Ionenradien ihre eigene Koordinationssphäre optimieren. Ein grosser Vorteil der Abfallgläser gegenüber den keramischen Verfestigungsformen liegt auch in ihrer einfachen Herstellung im Schmelzfluss.

Die Abfallgläser wurden im Laufe von 30 Jahren optimiert und bis zur industriellen Fertigung entwickelt. Dagegen ist die Entwicklung der keramischen Verfestigungsformen weniger weit fortgeschritten (R. Grauer 1984 a; W. Lutze, R.C. Ewing, 1988), und sie haben bisher die erwarteten Vorteile nicht gebracht.

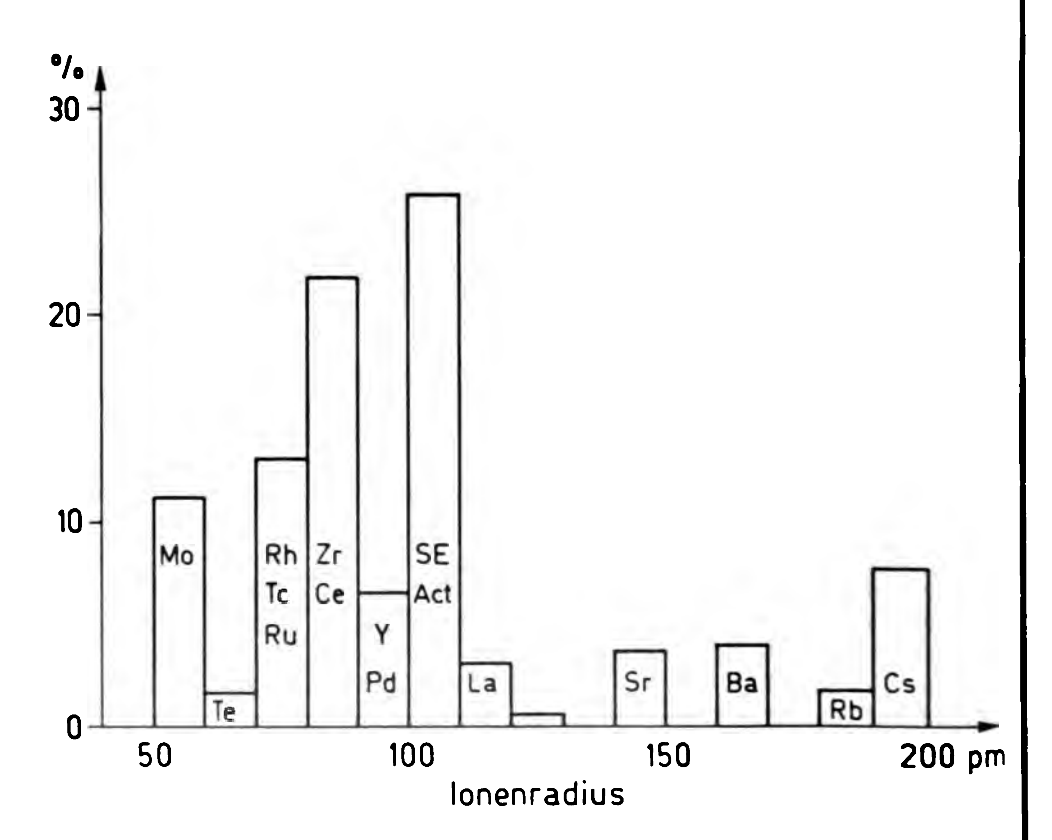


Bild 4 Die chemische Zusammensetzung von hochradioaktivem Abfall, geordnet nach der Häufigkeit der Ionenradien. SE: Seltene Erden.

Fig. 4 The chemical composition of high-level radioactive waste and the distribution of ionic radii. SE: rare earth elements.

5.2 Die Stabilität von Gläsern

Weil Gläser weniger stabil sind als ein Kristallgemenge gleicher Zusammensetzung, können sie bei erhöhter Temperatur kristallisieren und dabei ihre Eigenschaften verändern. Die Spaltproduktbeladung und die Dimension der Glasblöcke sind deshalb so festzulegen, dass die Zentraltemperatur des Blocks unter 500 °C liegt. Nach dem Abklingen der Zerfallswärme ist unter Endlagerbedingungen (ca. 60 °C) eine thermische Restrukturierung auch in geologischen Zeiträumen nicht zu befürchten. Diese Aussage stützt sich u. a. auf Experimente bei hohen Temperaturen und theoretische Überlegungen über die Temperaturabhängigkeit der Keimbildungsraten und der Kristallwachstumsgeschwindigkeit sowie auf die Auswertung der Literatur über natürliche Basaltgläser (R. Grauer, 1983, 1985).

Es stellt sich ferner die Frage nach der Stabilität der Gläser gegen die Auswirkungen des radioaktiven Zerfalls. Im Laufe von 10^5 Jahren ereignen sich pro Liter Glas mit einem Abfallgehalt von 12% etwa 10^{21} α- und 5×10^{22} β-Zerfälle (W. J. Weber, F. P. Roberts, 1983). Strukturschäden in Feststoffen werden vor allem durch den α-Zerfall verursacht, weil die Energie des Rückstosskerns im Nahbereich (ca. 10 nm) durch Stossprozesse abgegeben wird. Dadurch erfolgen einige tausend Atomverschiebungen pro Zerfallsereignis.

Bei α-Dosen dieser Grössenordnung quellen kristalline Stoffe um mehrere Prozente. Wegen den Atomverschiebungen geht die Gitterperiodizität verloren, und die Substanz wird amorph. Die Auswirkung solcher Schäden auf das mechanische und chemische Verhalten kristalliner Verfestigungsformen ist bisher nur ungenügend bekannt. Im Gegensatz dazu liegen zahlreiche Untersuchungen an Gläsern vor, die durch Dotierung mit kurzlebigen α-Strahlern auf ein «Abfallalter» von 10^5 Jahren gebracht wurden (R. Grauer, 1983, 1985). Die Dichteveränderungen sind mit weniger als ± 1% wesentlich geringer als bei kristallinen Stoffen, die mechanische Integrität bleibt erhalten, und das Korrosionsverhalten wird durch den α-Zerfall nicht nachteilig beeinflusst.

Die üblichen Gebrauchsgläser eignen sich wegen ihrer hohen Flusstemperaturen von etwa 1400 °C nicht zur Abfallverfestigung, weil sich bei diesen Temperaturen ein Teil der Radionuklide – vor allem das in hoher Konzentration vorliegende Caesium-137 – verflüchtigt. Es wurden deshalb spezielle Akali-Borosilicatgläser mit etwa 50% SiO_2 und 15 ÷ 20% B_2O_3 entwickelt, deren Flusstemperatur bei 1100 °C liegt. Der Abfallgehalt wird wegen der Zerfallswärme auf 12% begrenzt. Die industriell hergestellten Gläser werden in Kanister aus nichtrostendem Stahl mit einem Inhalt von 150 Litern vergossen.

5.3 Das Korrosionsverhalten der Abfallgläser

Für die Korrosion von Gläsern haben sich lange Zeit nur Spezialisten der Glasindustrie und einige Archäologen interessiert. Die Wahl von Borosilicatgläsern für die Verfestigung von hochaktivem Abfall hat diesem Fachgebiet neue Impulse gegeben, und die weltweite Bearbeitung dieses Themas hat zu

einem vertieften Verständnis der massgebenden Reaktionsmechanismen geführt (R. Grauer, 1983, 1985).

Bringt man Silicatgläser mit Wasser in Kontakt, werden zunächst die Alkali- und in geringerem Masse die Erdalkaliionen ausgelaugt:

$$>\mathrm{Si{-}O{-}Na} + H_2O \rightarrow\ >\mathrm{Si{-}OH} + Na^+ + OH^-$$

(>Si bedeutet ein im Glasnetzwerk fixiertes Siliciumatom.) Dadurch entsteht auf der Glasoberfläche eine hydratisierte Schicht, und gleichzeitig steigt der pH-Wert an, wenn das Verhältnis der Glasoberfläche zum Lösungsvolumen gross ist. Diese Auslaugung ist diffusionskontrolliert, und ihre Geschwindigkeit nimmt deshalb mit $t^{-1/2}$ ab.

Neben der selektiven Auslaugung wird aber auch das Glasnetzwerk abgebaut; dabei werden sämtliche Glasbestandteile freigesetzt. Bei Raumtemperatur und bei pH-Werten unter etwa 9 verläuft der Netzwerkabbau ausserordentlich langsam: Auch sehr alte Weinflaschen zeigen auf der Innenseite bekanntlich keinen Angriff. Bei pH-Werten über 9 steigt die Reaktionsgeschwindigkeit jedoch stark an: Der Chemiker weiss, dass Gläser nur bedingt laugenbeständig sind.

Für die Endlagersituation interessiert die selektive Auslaugung wenig, weil sie ein vorübergehendes Phänomen ist und beispielsweise bei 90 °C das Korrosionsgeschehen nur während weniger Tage bestimmt. Wichtig ist allein die Abbaugeschwindigkeit des Netzwerks unter stationären Bedingungen. Wegen der langsamen Reaktion erfordert die Einstellung stationärer Zustände Experimente bei erhöhter Temperatur (üblich sind 90 °C) und bei einem begrenzten Lösungsangebot, d. h. bei einem hohen Oberflächen/Volumen-Verhältnis, wie es auch für die Endlagersituation charakteristisch ist. Stationäre pH-Werte stellen sich dann im Verlauf von einigen Tagen ein, während dieser Vorgang bei 40 °C mehr als ein Jahr erfordert.

Die Glaszusammensetzung hat einen bedeutenden Einfluss auf das Korrosionsverhalten. Hohe SiO_2-Gehalte wirken sich günstig aus. Die Zusammensetzung ist aber durch den Glashersteller vorgegeben. Ebenfalls vorgegeben ist die Temperatur im Endlager als eine weitere Einflussgrösse.

Der für die Geschwindigkeit des Netzwerkabbaus mitbestimmende pH-Wert wird bei geringem Lösungsangebot durch die Glaskorrosionsprodukte festgelegt: Die Lösung wird durch Kieselsäure/Silicat und Borsäure/Borat bei pH $\simeq$ 9,5 stark gepuffert.

Einen grossen Einfluss auf die Glasumsetzung hat ferner die Kieselsäurekonzentration der Lösung (Bild 5). Aus zahlreichen Untersuchungen hat sich erhärtet, dass sich ihr Einfluss mit einer Kinetik erster Ordnung beschreiben lässt. Die Auflösungsgeschwindigkeit ist somit proportional zu $(C^{x} - C)$. Dabei ist C die Konzentration der gelösten Kieselsäure, und C^{x} ist eine fiktive Sättigungskonzentration des Glases. Fiktiv ist sie deshalb, weil die Glasauflösung irreversibel ist. Die Lösungskonzentration C wird schliesslich

durch die Ausfällung einer Sekundärphase (z. B. amorphe Kieselsäure) limitiert. Im Gegensatz zu einem reversiblen Lösevorgang ist C^x stets grösser als C, und der Netzwerkabbau verläuft mit einer konstanten stationären Endgeschwindigkeit.

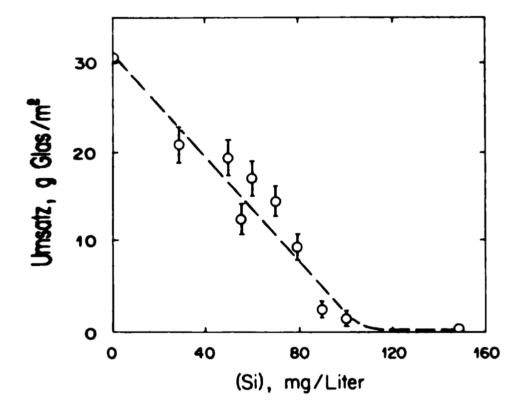


Bild 5 Der Einfluss von zugesetzter gelöster Kieselsäure auf die Korrosion eines Borosilicat-Abfallglases bei 90 °C. Versuchsdauer: 28 Tage (nach L. R. Pederson et al., 1983).

Fig. 5 The influence of added dissolved silicic acid on the corrosion behaviour of a borosilicate waste glass at 90 °C. Duration of experiments: 28 days.

Das Korrosionsverhalten der Abfallgläser ist u. a. in einem mehrjährigen internationalen Forschungsprogramm unter Beteiligung von Japan, Schweden und der Schweiz untersucht worden (JSS, 1988). Dabei wurde auch der Nachweis erbracht, dass sich die hochaktiven Gläser in ihrem Verhalten nicht von inaktiven Simulaten gleicher Zusammensetzung unterscheiden. Deshalb konnten die arbeits- und sicherheitstechnisch aufwendigen Experimente mit den Originalgläsern stark reduziert werden.

Aus Langzeitexperimenten und aus dem Verhalten natürlicher Basaltgläser kann für das Abfallglas eine Korrosionsgeschwindigkeit unter Endlagerbedingungen von 10^{-3} g/m^2 × Tag abgeleitet werden. Dies entspricht einem Abtrag von einem Centimeter Glas in 80 000 Jahren. Weil die Glasblöcke beim Abkühlen zerspringen, muss eine Oberflächenvergrösserung berücksichtigt werden. In der Sicherheitsanalyse des Projekts Gewähr wurde deshalb pessimistisch eine Auflösungszeit von 150 000 Jahren angenommen, und der Abbau des Glases wurde als einfacher Auflösungsprozess modelliert. In Wirklichkeit bilden sich dabei aber feste Umwandlungsprodukte, vorwiegend komplexe Silicate, die einen Teil der freigesetzten Nuklide durch Mitfällung wiederum fixieren. Dieser für die Rückhaltung positive Aspekt bleibt in der Sicherheitsanalyse unberücksichtigt, weil sich diese Sekundärphasen nur schlecht charakterisieren lassen.

6 Das Verfüllmaterial

Das Verfüllmaterial ist ein wichtiges Glied in der Kette der Sicherheitsbarrieren, das einer Reihe von mechanisch/physikalischen wie auch chemischen

Anforderungen zu genügen hat. Die wichtigsten sind:
- Geringe Wasserdurchlässigkeit im Vergleich zum Wirtgestein
- Quellvermögen zur Abdichtung baubedingter Zwischenräume und von Gesteinsspalten
- Plastizität zum Auffangen von Gesteinsverschiebungen und zur homogenen Druckverteilung, gleichzeitig auch
- genügende Tragfähigkeit, um das Absinken der Kanister zu verhindern
- hohes Rückhaltevermögen für Radionuklide und Kolloide
- Stabilität über einen Zeitraum von mindestens 10^6 Jahren.

Dieses Anforderungsprofil wird von natürlich vorkommenden Bentoniten weitgehend erfüllt (R. Grauer, 1986, 1988). Ihre wesentliche Komponente ist das Tonmineral Montmorillonit, dessen Eigenschaften in engem Zusammenhang mit seiner Struktur stehen.

6.1 Struktur und Quellverhalten von Montmorillonit

Der Montmorillonit gehört – zusammen mit dem hier ebenfalls interessierenden Illit – zu der variantenreichen Klasse der Dreischichtsilicate. Ihre Bausteine sind SiO_4-Tetraeder [T] und MO_6-Oktaeder (O), wobei das Metallion M meist Aluminium oder Magnesium ist. Als struktureller Prototyp kann der Pyrophyllit, $[Si_4](Al_2)O_{10}(OH)_2$, betrachtet werden, der aus T-O-T-Schichtpaketen mit einer Dicke von 1 nm aufgebaut ist. Der Montmorillonit leitet sich aus dieser Struktur durch isomorphen Ersatz von Aluminium durch Magnesium in der Oktaederschicht ab. Dadurch erhalten die Schichtpakete negative Ladungen, die durch Einlagerung von Alkali- oder Erdalkaliionen in die Zwischenschichträume kompensiert wird. Die Idealformel von Natrium-Montmorillonit ist

$$Na_{0,33}[Si_4](Al_{1,66}Mg_{0,33})O_{10}(OH)_2.$$

Ähnlich ist der Illit aufgebaut, wobei die gegenüber dem Montmorillonit höhere Schichtladung durch isomorphen Ersatz von Silicium durch Aluminium in der Tetraederschicht zustande kommt. Die Idealformel ist

$$K_{0,66}[Si_{3,33}Al_{0,66}](Al_2)O_{10}(OH)_2.$$

Durch die Hydratation der Zwischenschichtionen können die Dreischichtsilicate quellen. A. Weiss (1958) hat in einer klassischen Arbeit festgehalten, dass die massgebenden Grössen für das Quellverhalten die Flächendichte der Ladung, die Ladung und das Solvatationsverhalten der Zwischenschichtionen und die Wasseraktivität sind.

Der niedriggeladene Natrium-Montmorillonit kann vollständig in die einzelnen Schichtpakete dispergieren, während die Quellung der Calcium-Variante begrenzt ist; die maximale Schichtaufweitung beträgt 1 nm. Im Gegen-

satz zum Montmorillonit ist der Illit nicht quellbar, weil die Kaliumionen der Zwischenschichten nur eine geringe Hydratationstendenz haben.

Erfolgt die Quellung des Montmorillonits im Endlager in einem begrenzten Volumen, so wird ein Quelldruck aufgebaut, der je nach der Dichte des eingesetzten Materials mehrere hundert bar erreichen kann und somit in der Grössenordnung des lithostatischen Drucks im Endlager liegt. Unter diesen Bedingungen liegt der Wassergehalt des Bentonits unter 30%. Auf dieser Quellbarkeit bei Wasserzutritt beruht die gute Barrierenwirkung des Bentonits.

6.2 Die Langzeitstabilität des Montmorillonits

Weil die Barrierenwirkung der Endlagerverfüllung möglichst lange erhalten bleiben soll, sind mögliche diagenetische Umwandlungen des Montmorillonits in Betracht zu ziehen, wobei die Umsetzung zu Illit im Vordergrund steht. Durch eine solche Reaktion würde das Quellvermögen und auch die Kationenaustauschkapazität der Verfüllung beeinträchtigt.

Für die Bildung von Illlit aus Montmorillonit müssen zwei Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein, nämlich

- die Erhöhung der (tetraedrischen) Schichtladung auf Werte über 0,6 pro $O_{10}(OH)_2$-Einheit und
- der Ersatz der Zwischenschichtionen durch Kaliumionen.

In der Natur erfolgt der Übergang von Montmorillonit zu Illit über Zwischenstufen von Wechsellagerungen aus Illit- und Montmorillonit-Schichten. Die Erhöhung der Schichtladung allein beeinträchtigt die Quellbarkeit nicht. Sie geht erst dann verloren, wenn die Zwischenschichtionen gegen Kalium ausgetauscht werden.

Für den hypothetischen Fall, dass der Zutritt von Kaliumionen zum Endlager die Illitbildung kontrolliert, kann der Umsatz aus dem Kaliumangebot durch das Grundwasser, aus den Endlagerdimensionen und aus der Kationenaustauschkapazität abgeschätzt werden. Bei einem angenommenen Wasserfluss von 0,7 Liter pro Kanister und Jahr und einer Kaliumkonzentration des Wassers von 1,15 mmol/Liter würde die vollständige Umwandlung des Montmorillonits etwa 7×10^7 Jahre erfordern (Nagra, 1985/04).

Geht man anderseits davon aus, dass die Erhöhung der Schichtladung geschwindigkeitsbestimmend ist, müssen Daten über die Umwandlungskinetik von Montmorillonit zu Illit beigezogen werden. Diese Reaktion erfolgt bei geringem Wasserdurchsatz isochemisch über die Lösung, wobei aus drei Montmorillonitschichten etwa zwei Illitschichten und Kieselsäure entstehen. Die Umsetzung verläuft ausserordentlich langsam; ihre Kinetik kann deshalb im Labor nur unter hydrothermalen Bedingungen ($T \geq 250\,°C$) untersucht werden. Die Extrapolation auf die Temperatur des Endlagers führt ebenfalls zu einer «Lebensdauer» des Montmorillonits in der Grössenordnung von 10^6 Jahren. Wegen der Unsicherheit in den Aktivierungsenergien ist eine solche Extrapolation allerdings problematisch.

Eine wesentliche Stütze in der Beurteilung der Langzeitstabilität bilden deshalb die Untersuchungen an natürlichen Analogen, die in Form von Tonsedimenten in grosser Anzahl vorliegen. Besonders intensiv sind beispielsweise die Tone am Golf von Mexiko im Zusammenhang mit den dortigen Erdölvorkommen analysiert worden. Diese Sedimente haben sich im Laufe von etwa 2×10^8 Jahren kontinuierlich abgelagert.

In einer Reihe von Arbeiten wurde der Anteil an quellbaren Schichten der Tonmineralien in Bohrkernen untersucht. Bild 6 zeigt an zwei typischen Beispielen, dass eine nennenswerte Illitisierung auch in alten Sedimenten erst bei Temperaturen über 80 °C einsetzt. Unabhängig vom geologischen Alter beträgt der maximale Illitanteil etwa 80 %.

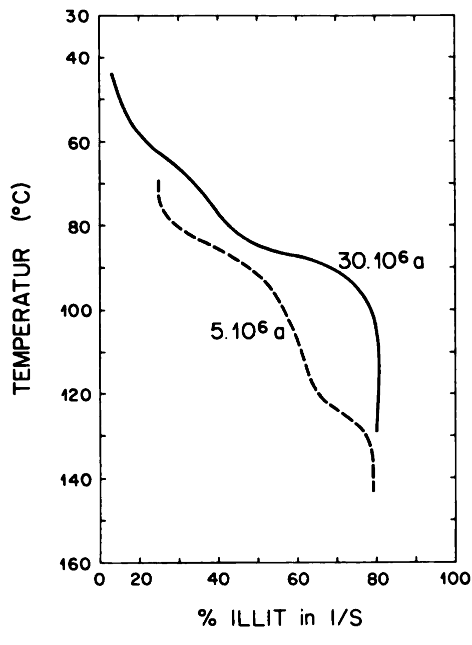


Bild 6 Illit-Anteile in Illit/Smectit-Wechsellagerungen (I/S) von tonhaltigen Sedimenten in zwei verschiedenen Bohrungen am Golf von Mexiko (nach S. M. Couto Anjos, 1986).

Fig. 6 The proportion of illite in illite/smectite interstratifications (I/S) in two bore cores from argillaceous sediments, Gulf of Mexico.

Die Auswertung der zahlreichen Untersuchungen an natürlichen Analogen führt zum Schluss, dass bei einer Endlager-Temperatur von 60 °C auch in Zeiträumen von weit über 10^6 Jahren nicht mit einer drastischen Veränderung der Quellbarkeit, der hydraulischen Konduktivität oder der Kationenaustauschkapazität der Verfüllung zu rechnen ist. Die Bildung von Illit/Montmorillonit-Wechsellagerungen im Laufe der Zeit ist zwar nicht auszuschliessen, wohl aber eine vollständige Illitisierung.

6.3 Bentonit als Transportbarriere

Der kompaktierte und gequollene Bentonit hat eine ausserordentlich kleine hydraulische Leitfähigkeit in der Grössenordnung von 10^{-13} bis 10^{-14} m/s.

Dies bedeutet, dass das Verfüllmaterial praktisch wasserundurchlässig ist, und dass der Ionentransport durch die Verfüllung nur durch Diffusion erfolgt. Wegen der Adsorption am Montmorillonit wird der Transport zahlreicher Nuklide weiter verzögert. Experimentell wurden an kompaktiertem Bentonit für eine Reihe von schwach sorbierenden Nukliden Diffusionskoeffizienten in der Grössenordnung von 10^{-11} bis 10^{-12} m^2/s gemessen. Für stark sorbierende Elemente wie Americium und Thorium (als Repräsentant der vierwertigen Actiniden) sind die entsprechenden Werte kleiner als 10^{-14} m^2/s. Für eine Diffusionsstrecke von einem Meter lässt sich mit diesem Wert eine Durchbruchszeit von über 300 000 Jahren berechnen. Das bedeutet, dass die Nuklide Americium-243 und Plutonium-240, eventuell auch Plutonium-239, in einem intakten Endlager noch innerhalb der Tunnelverfüllung zerfallen.

7 Die Barrierenwirkung der Geosphäre

Die aus dem Endlagerbereich in das Wirtgestein übertretenden Radionuklide können mit zirkulierendem Grundwasser in die Biosphäre transportiert werden. Die Wasserfliesszeiten liegen in der Grössenordnung von 100 Jahren; für langlebige Nuklide wären sie belanglos. Durch die Adsorption am Gestein, vor allem auch durch Matrixdiffusion wird aber der Transport zur Oberfläche gegenüber dem Wasserfluss verzögert. Die Sorption ist elementspezifisch und führt zu Retentionsfaktoren um 100 bis 100 000. Die Wirkung der Matrixdiffusion erstreckt sich auch auf nichtsorbierende Nuklide und ergibt Retentionsfaktoren, die um Grössenordnungen höher sein können als diejenigen für Adsorption in Zonen zirkulierenden Wassers.

Die Aufgabe des Chemikers ist es nun, für das Transportmodell Sorptionsdaten und Angaben über die Konzentrationen der Radionuklide in den Grundwässern zur Verfügung zu stellen. Der Schwerpunkt liegt bei den besonders langlebigen Actiniden und Spaltprodukten wie (mit der Halbwertszeit in Megajahren) Neptunium-237 (2,1), Zirkon-93 (1,5), Technetium-99 (0,2), Caesium-135 (2,0) und Palladium-107 (6,5).

Eine Reihe relevanter Nuklide bildet mit den Grundwasserbestandteilen schwerlösliche Verbindungen. Ihre Freisetzung aus dem Endlager ist deshalb bei gegebenem Wasserfluss durch ihre Löslichkeit begrenzt; sie kann mit den thermodynamischen Daten für die Festphasen und für alle beteiligten gelösten Spezies berechnet werden (M. Schweingruber, 1983). Für die Berechnung dieser Löslichkeitslimiten stehen gut ausgearbeitete Rechenprogramme zur Verfügung. Die Auswahl der «richtigen» thermodynamischen Daten ist aber nicht trivial. Literaturdaten sind mit chemischem Sachverstand kritisch zu sichten und vor allem auch auf ihre Konsistenz zu prüfen (z. B. B. Baeyens, I. G. McKinley, 1989).

Die Erarbeitung der Sorptionsdaten für die verschiedenen Nuklide an den Gesteinen der Wasserfliesspfade erfordert umfangreiche Experimentalpro-

gramme, die sich über Jahre erstrecken. Im «Projekt Gewähr 1985» wurden für die Sicherheitsanalyse konservativ niedrige Verteilungskoeffizienten (lineare Isothermen) verwendet (Nagra, 1985/05). Mit inzwischen erarbeiteten realistischen Daten und der Beschreibung der Sorption mit nichtlinearen Isothermen ergeben sich – wie für das Caesium-135 gezeigt worden ist – Nuklidflüsse, die um Grössenordnungen unter den Ergebnissen der frühern konservativen Rechnung liegen (A. Jakob et al., 1989).

Zur Absicherung der experimentell bestimmten Adsorptionsdaten sind physikalisch-chemische Modelle beizuziehen, die es erlauben, die Änderung des Sorptionsverhaltens bei wechselnder Wasser- oder Gesteinszusammensetzung zu beurteilen. Solche Adsorptionsmodelle, die sich auch an natürlichen Systemen bewährt haben, können übernommen werden (R. Grauer, 1990).

Schliesslich ist zu berücksichtigen, dass die Radionuklide im Wasser nicht nur in gelöster Form, sondern auch adsorbiert an Gewässer-Kolloiden transportiert werden können. Weil der kolloidal gebundene Anteil der Matrix-Diffusion entzogen ist, muss diese Transportmöglichkeit sorgfältig analysiert werden. Die Grundlagen dazu bilden wiederum Adsorptionsmodelle sowie ebenfalls bekannte Modelle über das Transportverhalten der Kolloide in Aquiferen (R. Grauer, 1990).

8 Schlussbemerkungen

Bei vielen Wissenschaftlern gilt es heute als anrüchig, sich mit der Beseitigung von Abfällen zu befassen. Es ist in diesem Zusammenhang die Rede vom drohenden Verlust der Unschuld der Erdwissenschaften oder von einer «überforderten Wissenschaft», und anstelle sachlicher Argumentation wird die wissenschaftliche und persönliche Integrität derjenigen angezweifelt, die sich mit dieser Materie befassen (W. Wildi, 1988). Endlagerkonzepte werden destruktiv kritisiert, und die Lösung des Abfallproblems wird offenbar nur in der Stilllegung der Kernkraftwerke gesehen.

Solche Bankrotterklärungen führen in eine Sackgasse, denn es wird die Tatsache verdrängt, dass hochradioaktive Abfälle bereits in grossen Mengen vorliegen und – als Tribut an unseren Wohlstand – weiterhin produziert werden. Weltweit stehen gegenwärtig 438 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 321 GW in Betrieb (SVA, 1990). Seit 1980 hat die installierte Leistung um das 2,4fache zugenommen. Ein Ausstieg aus der Kernenergie würde die Abfallsituation nur quantitativ ändern. Die Endlagerung der hochaktiven Abfälle ist somit weltweit eine Umweltschutzaufgabe mit hoher Priorität, die nicht verdrängt werden darf, und der sich Wissenschaftler und Techniker – unabhängig vom energiepolitischen Credo des einzelnen – zu stellen haben.

Wegen der spezifischen Themenstellung kommt in diesem Aufsatz zu wenig zum Ausdruck, dass die Konzeption, der Bau und die Sicherheitsanalyse eines Endlagers eine ausgesprochen multidisziplinäre Aufgabe ist, zu deren

Lösung die Chemiker neben Geologen, Hydrologen, Physikern und Ingenieuren nur einen Teil beitragen. Von allen Beteiligten wird neben der profunden Beherrschung des eigenen Fachgebietes die Fähigkeit zum Systemdenken verlangt.

Sieht man von den politischen Aspekten ab, so ist die Endlagerung ein wissenschaftliches Problem, das sich somit nur mit wissenschaftlichen Methoden und Ansätzen lösen lässt. Von der Gesamtthematik konnten hier nur sehr skizzenhaft die chemischen Aspekte beschrieben werden. Es ist gezeigt worden, dass die Endlagerchemie auf bekannten Grundlagen aufbaut; es muss nicht eine neue Spezialchemie entwickelt werden. Es ist auch gezeigt worden, dass Abschätzungen über die Langzeitstabilität einzelner Barrieren nicht auf tönernen Füssen stehen. Es sollte aber auch der Eindruck vermittelt werden, dass die Endlagerchemie dennoch nicht trivial ist, und dass nur nach intensiver Beschäftigung mit der Materie die Gedankengänge und Argumentationen verständlich werden, die in eine Sicherheitsanalyse einfliessen. Die dazu notwendige Literatur ist umfangreich; sie liegt aber offen, und es gibt keine Geheimdokumente.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Endlagerung liessen sich auch für die anderen beteiligten Fachgebiete darlegen. Für den involvierten Wissenschaftler jeder Fachrichtung stellt die sichere Endlagerung der hochaktiven Abfälle eine Herausforderung dar, der er sich gerne stellt, weil die Anforderungen an sein Wissen und Können gross sind und weil ein hohes Mass an Verantwortungsbewusstsein verlangt wird. Wer Probleme lieber verdrängt, anstatt sie zu lösen, aber auch der schnelle Macher, sollte sich von dieser Materie fernhalten.

9 Literatur

Um den Umfang dieses Verzeichnisses in vertretbaren Grenzen zu halten, wurden vor allem zusammenfassende und Übersichtsarbeiten zitiert, die ihrerseits umfangreiche weiterführende Literaturverzeichnisse enthalten. Die EIR-, bzw. PSI-Berichte sind in grösseren Bibliotheken (z. B. ETH) vorhanden; sie können auch von der Bibliothek des Paul-Scherrer-Instituts bezogen werden.

Baeyens, B.; McKinley, I. G. (1989), A PHREEQUE Database for Pd, Ni and Se. PSI-Bericht Nr. 34. PSI Villigen, 59 Seiten.

Chapman, N. A.; McKinley, I. G.; Smellie, J. A. T. (1984), The Potential of Natural Analogues in Assessing Systems for Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste. EIR-Bericht Nr. 545. EIR Würenlingen, 103 Seiten.

Chapman, N. A.; McKinley, I. G. (1987), The Geological Disposal of Nuclear Waste. J. Wiley & Sons, Chichester, 280 Seiten.

Côme, B.; Chapman, N. A., Herausgeber (1987), Natural Analogues in Radioactive Waste Disposal. Graham and Trotman, London, 492 Seiten.

Couto Anjos, S. M. (1986), Absence of Clay Diagenesis in Crataceous Tertiary Marine Sediment Shales, Campos Basin, Brazil. Clays and Clay Minerals *34* (4): 424–434.

Grauer, R. (1983), Gläser zur Verfestigung von hochradioaktivem Abfall: ihr Verhalten gegenüber Wässern. EIR-Bericht Nr. 477. EIR Würenlingen, 157 Seiten.

Grauer, R. (1984 a), Kristalline Stoffe zur Verfestigung hochradioaktiver Abfälle. EIR-Bericht Nr. 508. EIR Würenlingen, 107 Seiten.

Grauer, R. (1984 b), Behältermaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: Korrosionschemische Aspekte. EIR-Bericht Nr. 523. EIR Würenlingen, 108 Seiten.
Grauer, R. (1985), Synthesis of Recent Investigations on Corrosion Behaviour of Radioactive Waste Glasses. EIR-Bericht Nr. 538. EIR Würenlingen, 83 Seiten.
Grauer, R. (1986), Bentonit als Verfüllmaterial im Endlager für hochaktiven Abfall: Chemische Aspekte. EIR-Bericht Nr. 576. EIR Würenlingen, 179 Seiten.
Grauer, R. (1988), Zum chemischen Verhalten von Montmorillonit in einer Endlagerverfüllung. PSI-Bericht Nr. 11. PSI Villigen, 76 Seiten.
Grauer, R. (1990), Zur Chemie von Kolloiden: Verfügbare Sorptionsmodelle und zur Frage der Kolloidhaftung. PSI-Bericht Nr. 65. PSI Villigen, 135 Seiten.
Herrmann, A. G. (1985), Radioaktive Abfälle – Probleme und Verantwortung. Springer-Verlag Berlin, 256 Seiten.
HSK (1980), Schutzziel für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie für Kernanlagen R-21. Eidg. Kommission für die Sicherheit der Atomanlagen KSA und Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK. HSK Würenlingen.
Jakob, A.; Hadermann, J.; Rösel, F. (1989), Radionuclide Chain Transport with Matrix Diffusion and Non-Linear Sorption. PSI-Bericht Nr. 54. PSI Villigen, 64 Seiten.
JSS (1988), JSS Project Phase V, Final Report. Testing and Modelling of the Corrosion of Simulated Waste Glass Powders in a Waste Package Environment. JSS Technical Report 88–02. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, 172 Seiten.
KBS (1978), Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High-Level Reprocessing Waste, Vol. IV: Safety Analysis. Kärnbränsle-Säkerhet Stockholm, 125 Seiten.
Lutze, W.; Ewing, R. C., Herausgeber (1988), Radioactive Waste Forms for the Future. North Holland Amsterdam, 778 Seiten.
Milnes, A. G. (1985), Geology and Radwaste. Academic Press London, 328 Seiten.
Nagra (1985/01–05), Projekt Gewähr 1985, Projektberichte.
NGB 85–01, Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. 316 Seiten.
NGB 85–02, Radioaktive Abfälle: Eigenschaften und Zuteilung auf die Endlagertypen. 209 Seiten.
NGB 85–03, Endlager für hochaktive Abfälle: Bautechnik und Betriebsphase. 177 Seiten.
NGB 85–04, Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. 303 Seiten.
NGB 85–05, Endlager für hochaktive Abfälle: Sicherheitsbericht. 226 Seiten. Nagra, Baden.
PAGIS (1988), PAGIS – Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste. N. Cadelli et al., Herausgeber. EUR 11775 bis 11779. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 5 Bände, 3432 Seiten.
Pederson, L. R. et al. (1983), Glass Surface Area to Solution Volume Ratio and Its Implications to Accelerated Leach Testing. In: Brookins, D. G. (Ed.) (1983), Scientific Basis for Nuclear Waste Management VI. S. 47–53. North Holland Amsterdam.
Schweingruber, M. (1983), Actinide Solubility in Deep Groundwaters. Estimates for Upper Limits Based on Chemical Equilibrium Calculations. EIR-Bericht Nr. 507. EIR Würenlingen, 85 Seiten.
Simpson, J. P. (1984), Experiments on Canister Materials for Swiss High-Level Waste Disposal Projects, Part II. Nagra Technical Report NTB 84–01. Nagra, Baden, 74 Seiten.
SVA (1990), Kernkraftwerke der Welt. Stand 1.1.1990. Falttafel. Schweizerische Vereinigung für Atomenergie Bern.
Weber, W. J.; Roberts, F. P. (1983), A Review of Radiation Effects in Solid Nuclear Waste Forms. Nuclear Technology *60* (2): 178–198.
Weiss, A. (1958). Die innerkristalline Quellung als allgemeines Modell für Quellvorgänge. Chemische Berichte *91:* 487–502.
Wildi, W. (1988), Nachwort in W. Buser (1988), Mythos Gewähr, Geschichte der Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz. SES, Schweizerische Energiestiftung Zürich, 221 Seiten.

Prof. Dr. Rolf Grauer, Paul-Scherrer-Institut, Programm Entsorgung, 5232 Villigen PSI

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/4*: 239–258

Bioindikation mit Flechten an Rosskastanien am Zürichsee

C. Vonarburg, E. Ruoss, C. A. Burga, Luzern und Zürich

An ufernahen Standorten rund um den Zürichsee wurde an 131 Baumstämmen der Rosskastanie (*Aesculus* spec.) die Flechtenvegetation untersucht. Ein aus der Gesamtdeckung und der Artenzahl berechneter Flechtenindex zeigt im Untersuchungsgebiet einen deutlichen Gradienten zu einer besser entwickelten Flechtenvegetation in südwestlicher Richtung. Auch an Orten mit einem hohen Flechtenindex sind gegenüber Luftverunreinigungen empfindliche Arten selten und nur mit geringer Deckung vorhanden. Eine deutliche Tendenz zu einer besser entwickelten Flechtenvegetation hat sich auch von zentrumsnahen zu ausserhalb der Kernzonen liegenden Standorten gezeigt. Die selben Tendenzen widerspiegelt die Einteilung in sechs Flechtenzonen unter Einbezug von weiteren Parametern wie Schädigung und Vitalität. Die Resultate der Flechtenzonierung und des Flechtenindexes lassen auf eine abnehmende Belastung der Luft mit flechtenbeeinträchtigenden Stoffen vom nordwestlichen zum südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes schliessen. Der Vergleich mit technischen Immissionsmessungen weist auf die dominierende Rolle von Schwefeldioxid als flechtenschädigender Stoff hin, wobei im Untersuchungsgebiet synergistische Wirkungen mit anderen Schadstoffen wahrscheinlich sind.

Bioindication with epiphytic lichens on horse-chestnut trees around Lake Zurich

At sites close to the shore along Lake Zurich the lichen vegetation has been studied on 131 horse-chestnut tree-trunks (*Aesculus* spec.). A lichen index calculated from the total cover and the number of species showed in the investigation area a clear gradient to a better developed lichen vegetation towards southeastern direction. Even at sites with a high lichen index, species sensitive to air pollution are rare and show little cover. Furthermore, a clear tendency to a better developed lichen vegetation has been made evident from sites close to the center towards sites which are situated outside urban areas. Similar trends are shown by the zonation into six lichen zones including further parameters like damage and vitality of lichens. According to the results of zonation and lichen index, there is a decreasing concentration of lichen damaging pollutants from the northwestern towards the southeastern part of the investigation area. Compared to the results of the lichen studies the immission data of technical measurements indicate a dominant role of sulphure dioxide as lichen damaging pollutant whereas a synergistic effect together with other substances is very probable.

1 Einleitung

Schon seit geraumer Zeit werden epiphytische Flechten wegen ihrer Empfindlichkeit auf Abgase als Monitoren für die Belastung der Atmosphäre mit Luftfremdstoffen herangezogen. Ein Grund für diese Empfindlichkeit ist das störungsanfällige Gleichgewicht der Flechtensymbiose. Ausserdem versorgen sich die Flechten mit Nährstoffen vor allem aus der Luft. Da sie aber im Gegensatz zu höheren Pflanzen keine Spaltöffnungen aufweisen, dringen Luftverunreinigungen direkt in die Flechten ein und können sich dort akkumulieren. Wegen der langen Lebensdauer und der geringen Wachstumsrate integrieren die Flechten den Einfluss von Luftverunreinigungen über eine längere Zeitdauer und zeigen in Abhängigkeit zu den Schadstoffkonzentratio

sprechende Reaktionen: Die Wuchsleistung wird vermindert, die Flechtenthalli verfärben sich oder die Flechten sterben ganz ab. Die Empfindlichkeit der Flechten gegenüber Luftverunreinigungen ist abhängig von der Art und meist auch von der Wuchsform: Die Empfindlichkeit nimmt in der Regel von Krustenflechten zu Blatt-, Strauch- und Bartflechten zu, was u. a. auf die zunehmende Oberfläche der Thalli zurückzuführen ist. Da die physiologische Aktivität der Flechten vor allem vom Feuchtegehalt ihrer Thalli abhängig ist, können sie ganzjährig aktiv sein. Das Optimum ihrer Photosynthese erreichen die meisten mitteleuropäischen Flechten bei Temperaturen um 10 Grad Celsius. So sind sie besonders aktiv bei nebligen Inversionslagen, die häufig auch durch hohe Schadstoffkonzentrationen gekennzeichnet sind (R. Türk, 1988).

Der am besten untersuchte Schadstoff bezüglich seiner Wirkung auf Flechten ist Schwefeldioxid (SO_2), das als Nebenprodukt bei der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe entsteht. D. L. Hawksworth & F. Rose (1970 und 1976) zeigten, dass verschiedene Flechtenarten unterschiedlich anfällig auf SO_2 reagieren und erstellten eine Toxitoleranzreihe. Anhand von Begasungsversuchen wurde nachgewiesen, dass viele Arten schon bei kurzzeitiger Einwirkung von geringen SO_2-Belastungen mit einer deutlichen Einschränkung der Nettophotosyntheserate reagieren (R. Türk et al., 1974). Angaben über die schädigende Wirkung von Fluorwasserstoff (HF) und Schwermetallen (Kupfer und Zink) auf Flechten machen D. L. Hawksworth & F. Rose (1976). Zur Wirkung von Stickoxiden (NO_x) liegen noch wenige Untersuchungen vor. Es wurde erst ein Begasungsversuch mit NO_2 durchgeführt (T. H. Nash, 1976). Dabei konnten Schädigungen erst bei Dosen von 4 und 8 ppm festgestellt werden. Bei den im Freiland auftretenden Konzentrationen, die selten 1 ppm überschreiten, wurden keine Schädigungen festgestellt, so dass das NO_2 als toxischer Stoff für Flechten eine untergeordnete Rolle spielen dürfte (V. John, 1986). NO_2 wird in der Atmosphäre jedoch zu HNO_3 oxidiert. Eine schädigende Wirkung kann daher nicht ausgeschlossen werden, da nach R. Türk & M. Seger (1984) vor allem sauer reagierende Abgase toxisch wirken. Die Wirkung von Photooxidantien wie Ozon oder Peroxiacetylnitrat (PAN) auf Flechten ist noch wenig untersucht. Während T. H. Nash & L. L. Sigal (1979) in Kalifornien eine Empfindlichkeit von Flechten gegenüber diesen Stoffen feststellen konnten, fand B. Mc Cune (1988) in Indianapolis keinerlei Korrelation zwischen Ozonbelastung und Flechtenvegetation. Begasungsversuche von R. Guderian et al. (1985) zeigten eine schädigende Wirkung von Ozon auf die Blattflechte *Hypogymnia physodes*. Der synergistischen Wirkung der Schadstoffe messen u. a. V. John (1986) und V. Wirth (1988) eine entscheidende Rolle zu.

Bioindikationsmethoden mit Flechten werden weltweit seit etwa 100 Jahren angewendet. In der Schweiz wurden u. a. von P. Clerc & P.-D. Roh (1980) in Martigny, von R. Herzig et al. (1985) und R. Herzig & M. Urech (1988) im Raume Biel und an weiteren Einzelstationen in der Schweiz, von K. Peter (1988) im Bündner Rheintal, von H. Britt (1986) in Winterthur und gemein-

sam von der Arbeitsgemeinschaft Bioindikation (1989) und E. Ruoss & C. Keller (1988) im Kanton Luzern solche Untersuchungen durchgeführt. Aus Zürich liegen Flechtenerhebungen von V. Vareschi (1936), S. Züst (1977) und G. A. Ritschel (1976) vor.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erfassung von Veränderungen der Flechtenvegetation im Untersuchungsgebiet, das die ufernahen Gebiete am Zürichsee umfasst. Es sollten Unterschiede bezüglich der Bedeckung der Bäume mit Flechten, der Anzahl Arten und der Verteilung von Indikatorarten aufgezeigt werden. Um einen Standort bezüglich seiner Umweltbedingungen zu charakterisieren, war die Zusammensetzung der Flechtengemeinschaften und deren ökologische Ansprüche von besonderem Interesse. Weil die ökologischen Standortbedingungen für die Flechtenvegetation von entscheidender Bedeutung sind, beschränkte sich die Untersuchung auf seenahe Standorte und eine Trägerbaumart. Da das Untersuchungsgebiet z. T. erheblich mit Luftschadstoffen belastet ist, wurde versucht, schadstoffbedingte Beeinträchtigungen der Flechtenvegetation zu erfassen. Um Unterschiede im Untersuchungsgebiet herauszufinden, wurden mit Berücksichtigung von Flechtenschadbildern und der Vitalität Flechtenzonen ausgeschieden. Geprüft wurde dabei auch, ob sich eine Zonierung in Belastungsstufen, basierend auf einer Studie von R. Türk (1988), im Untersuchungsgebiet sinnvoll anwenden liesse.

Die vorliegende Arbeit ist eine gekürzte Fassung der Diplomarbeit, ausgeführt am Geographischen Institut der Universität Zürich unter der Leitung von PD Dr. C. A. Burga und Dr. E. Ruoss, Natur-Museum Luzern. Dieser Beitrag steht in einem grösseren Rahmen von Untersuchungen zur Bioindikation mittels epiphytischer Flechten von Luftschadstoffbelastungen urbaner Gebiete, welche unter der Leitung der oben Genannten seit 1986 durchgeführt werden. Eine erste diesbezügliche Arbeit über das Gebiet von Winterthur wurde 1986 durch Hanni Britt fertiggestellt. 1989 erfolgte die Untersuchung von Christian Vonarburg, dessen Kurzfassung hiermit publiziert wird. In zwei weiteren Diplomarbeiten zur Bioindikation von Luftschadstoffbelastungen wird der Flechtenbewuchs an Obstbäumen im Umkreis der Stadt St. Gallen von Patrick Meile und der epiphytische Bewuchs von Nussbäumen im Sottoceneri (Basso Ceresio und Mendrisiotto) von Corinna Walter untersucht.

2 Das Untersuchungsgebiet

Zum Untersuchungsgebiet gehören die landeinwärts liegenden, ufernahen Gebiete am Zürichsee (Bild 1). Als eiszeitlich geformter Voralpensee wird er beidseits von Hügelketten gesäumt. Die Ufer des unteren Teils vom Zürichsee sind sehr dicht überbaut, und erst ab Horgen finden sich noch grössere unverbaute Flächen in Seenähe. Weiter seeaufwärts ist das ufernahe Land zwischen den Ortszentren meist weniger stark versiegelt. Insbesondere in Seegemeinden mit dem Zentrum in unmittelbarer Seenähe muss mit einer erhöhten Schad-

stoffbelastung an ufernahen Standorten gerechnet werden. Solche Gemeinden sind z. B. Zürich, Horgen, Wädenswil, Richterswil und Rapperswil.

Eine weitere Quelle von Schadstoffimmissionen sind die stark befahrenen Hauptstrassen, die vor allem im unteren Seeteil in unmittelbarer Seenähe verlaufen. Im ganzen Untersuchungsgebiet ist die Luft stark mit Schadstoffen belastet, und die Immissionsgrenzwerte gemäss der Schweizerischen Luftreinhalteverordnung (LRV) werden beim Ozon und Stickstoffdioxid überschritten. Die Belastung mit Schwefeldioxid ist in der Stadt Zürich mit 23 $\mu g/m^3$ im Jahresdurchschnitt (1988) am höchsten. Tiefe Konzentrationen dieses Schadstoffes wurden in Gebieten ausserhalb von Siedlungen gemessen (Männedorf 1986: 8 $\mu g/m^3$). Die mittleren Lufttemperaturen liegen im Untersuchungsgebiet zwischen 8,5 und 9,6 Grad Celsius, und die mittleren jährlichen Niederschläge betragen zwischen 111,5 und 140 cm (M. Schüepp, 1960 und 1979, H. Uttinger, 1965). Aufgrund der klimatischen Bedingungen kann eine reiche Flechtenvegetation erwartet werden. In Seenähe ist ein fördernder Einfluss der Luftfeuchtigkeit zu erwarten; diese ist gegenüber dem Umland erhöht. Wegen der ausgleichenden Wirkung des Zürichsees bleiben die Lufttemperaturen im Winterhalbjahr häufig über dem Gefrierpunkt, wovon die Flechten mit ihrer physiologischen Aktivität auch bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt profitieren.

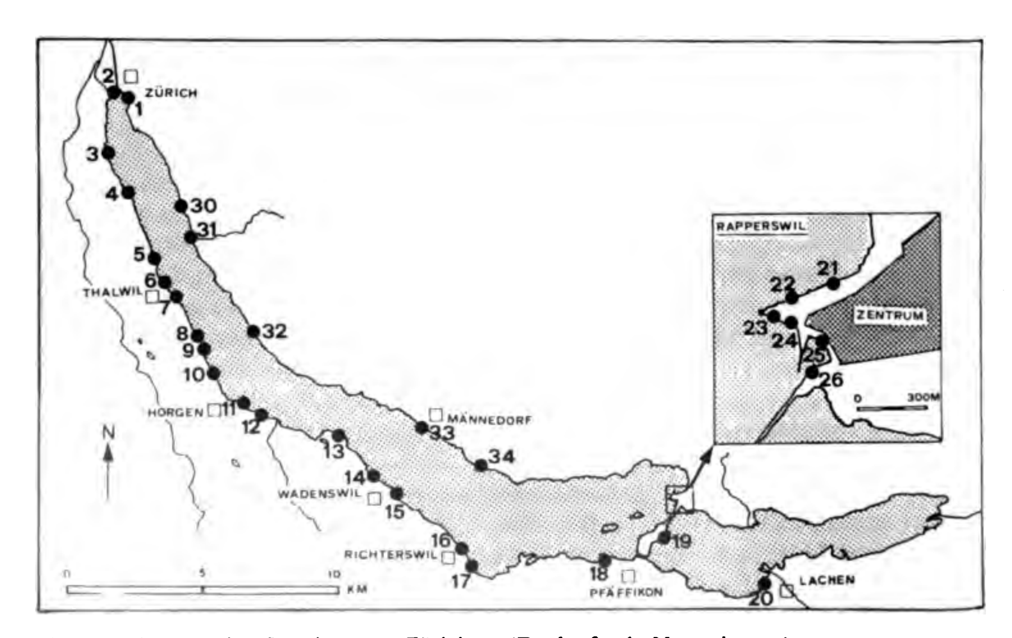


Bild 1 Untersuchte Standorte am Zürichsee (Fortlaufende Numerierung)

Fig. 1 Investigated sites at Lake Zurich (consecutive numbers)

ürichseeufer wurden pro Gemeinde einer oder mehrere, am rech-
elf Standorte ausgewählt. Die Felduntersuchungen erstreckten
: Jahre 1988 und 1989. An jedem Standort wurden mindestens die
reichsten Bäume bezüglich ihrer Flechtenvegetation untersucht.
ıum wurde die Rosskastanie (*Aesculus* spec.) ausgewählt, die am
:r häufigste Alleebaum ist. Die Rosskastanie eignete sich wegen
eraden Stammes, der bis in den Kronenbereich frei ist, besonders
Flechtenkartierung. Die Aufnahme erfolgte mittels Raster am hal-
ımfang an der flechtenreichsten Seite zwischen 40 und 180 cm
Boden. Um Störfaktoren wie Eutrophierung des bodennahen
:hs (Hunde und Staub) zu eliminieren, wurden die Parameter für
zonierung nur von 110 bis 180 cm über dem Boden berücksich-
Trägerbäumen wurden die Artenzahl (Summe der Arten), die Ge-
ȝ mit Flechten und die Deckung der einzelnen Arten nach der
n V. Wirth (1972) bestimmt. Die Bestimmung der Arten erfolgte
h (1980), bei der Gattung *Physcia* nach R. Moberg (1977), die No-
chtete sich nach V. Wirth (1987). Schwierig zu bestimmende Ar-
zu Artengruppen zusammengefasst:

ınctata-Gruppe: *Buellia poeltii, B. punctata* und *B. schaereri*
elaeochroma-Gruppe: *Lecidella achristotera, L. elaeochroma* und
ea
Nichtbestimmbare Krusten, v. a. der Gattungen *Buellia, Lepraria*
:tis
ıenz wurde nach J. Braun-Blanquet (1928) berechnet, für die Aus-
'de die durchschnittliche Deckung (in Klammern) berücksichtigt.

r Arten:		Frequenzklassen:	
lexemplar	(0,1 %)	I	0– 20%
1%	(1 %)	II	20– 40%
5%	(2,5 %)	III	40– 60%
12,5%	(8,75%)	IV	60– 80%
25%	(18,75%)	V	80–100%
50%	(37,5 %)		
75%	(62,5 %)		
100%	(87,5 %)		

Artenzahl und der geschätzten Gesamtdeckung wurde ein Flech-
:echnet (E. Ruoss & C. Keller, 1988), der den Zustand der Flech-
n widerspiegelt:

Flechtenindex = Deckung × Artenzahl / 100

Die Einteilung in Flechtengesellschaften erfolgte aufgrund der durchschnittlichen Deckung der Arten für jeden Standort. Die Flechtengemeinschaft mit dem grössten durchschnittlichen Deckungsgrad charakteristischer Arten wurde als repräsentative Gesellschaft einer Lokalität gewertet. Die Benennung der Gesellschaften erfolgte nach J. J. Barkman (1958), E. Kupfer-Wesely & R. Türk (1987, 1988) und G. A. Ritschel (1977). Angaben bezüglich der Toxitoleranz der Arten wurden V. Wirth (1980) entnommen. Der Toxitoleranzfaktor Q wurde als Quotient der Begleitartenzahl (BAZ) geteilt durch Anzahl Aufnahmen, wo die betreffende Flechte vorkommt (N), bestimmt:

$$Q = BAZ / N$$

Anhand des Faktors konnten die Arten Toxitoleranzklassen zugeordnet werden (F. Le Blanc & J. De Sloover, 1970 und R. Herzig & M. Urech, 1988). Der Toxitoleranzfaktor wurde nur für Arten berechnet, die in mehr als 5% der Aufnahmen auftraten. Für die Flechtenzonierung wurden die Parameter Gesamtdeckung der Blatt- und Strauchflechten, Art der Schädigung und Schädigungsgrad ausgewählter Flechtenarten erfasst. Die Vitalität der ausgewählten Flechten wurde als Thallusdurchmesser (bei Blattflechten) oder Thalluslänge (bei Strauch- und Bartflechten) des grössten Exemplars pro Rasterfläche erfasst. Die Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Flechtenzonen erfolgte nach den angepassten Zonierungskriterien für verschiedene Belastungszonen von H. Wittmann & R. Türk (1988):

Zone 1: Keine Belastung feststellbar. Es sind keine Schädigungen an Flechten feststellbar, und die Flechtenvegetation entspricht den gegebenen klimatischen und orographischen Verhältnissen.

Zone 2: Schwach belastete Zone. Deckungsgrad, Vergesellschaftung und Thallusgrössen sind nicht merklich beeinträchtigt. Empfindliche Arten zeigen äusserlich sichtbare Schädigungen. *Parmelia sulcata* zeigt oft Rotverfärbungen im Thalluszentrum oder Ausbleichungen. *Evernia prunastri, P. caperata* und *Pseudevernia furfuracea* weisen ausgebleichte Loben auf.

Zone 3: Mittel belastete Zone. Empfindliche Arten sind nur in juvenilem Zustand oder in Kümmerformen zu finden. Strauchflechten weisen deutlich ausgebleichte Lobenenden und gestauchte Lagerabschnitte auf. Auch unempfindliche Arten zeigen Schädigungen. Die Deckung der Blatt- und Strauchflechten ist verringert und beträgt oftmals weniger als 50%.

Zone 4: Mittel bis stark belastete Zone. Wie Zone 3, die Deckung der Blatt- und Strauchflechten liegt aber unter 25%.

Zone 5: Stark belastete Zone. Die meisten Blattflechten sind absterbend oder weisen Thallusgrössen von weniger als 1,5 cm auf. Strauchflechten (*Evernia prunastri* und *Pseudevernia furfuracea*) mit einer maximalen Thalluslänge von 1 cm.

Zone 6: Sehr stark belastete Zone. Nur wenige, resistente Krustenflechten sind vorhanden. Die Deckung der Blatt- und Strauchflechten liegt unter 1%.

Die Flechtenzonierung erfolgte in zwei Stufen: Zuerst wurde jeder Standort gemäss den Zonierungskriterien einer Zone zugeordnet und dann das Untersuchungsgebiet in sechs Teilabschnitte von je fünf Kilometer eingeteilt. Für die Zoneneinteilung wurde der Durchschnitt der Flechtenzonen der Standorte im jeweiligen Abschnitt bestimmt, wobei die Gewichtung aufgrund der Anzahl untersuchter Bäume erfolgte.

4 Resultate

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 131 ausgewählte Trägerbäume von *Aesculus* spec. an 31 Standorten erfasst. Die Exposition der flechtenreichsten Seite war am rechten Seeufer durchgehend seewärts gerichtet, während am linken Ufer die flechtenreichste Seite oft dem See abgewendet war (Bild 2). Expositionen zwischen Nordwest und Südwest waren am häufigsten. An den Trägerbäumen wurden insgesamt 43 Flechtenarten bzw. Artengruppen festgestellt. 37 davon kommen an den sechs Standorten in Rapperswil vor, während in Zürich, wo mehr Bäume in die Untersuchung einbezogen wurden, nur 14 Arten(-gruppen) vorkamen.

Tabelle 1 zeigt die Häufigkeiten der Flechtenarten(-gruppen), die an den Trägerbäumen gefunden wurden, sowie die zugehörigen Ökotoxitoleranzfaktoren (Q) bzw. Toxitoleranzklassen. Keine Arten(-gruppen) kamen in mehr als

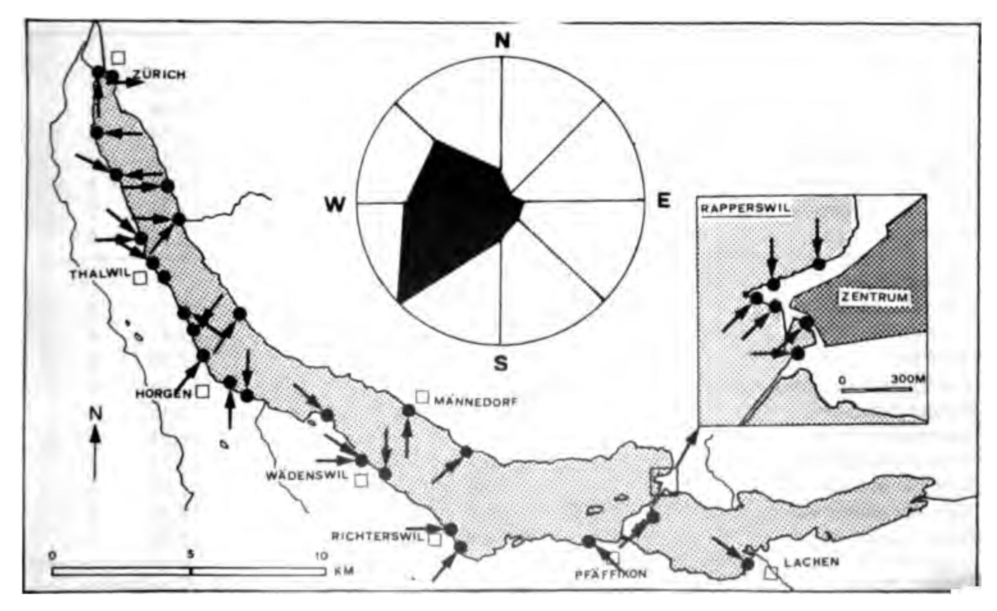


Bild 2 Expositionen der flechtenreichsten Seite der Trägerbäume

Fig. 2 Expositions of the most lichen rich parts of the examined trunks

Tabelle 1 Häufigkeit der Flechtenarten im Untersuchungsgebiet und ihre ökologischen Zeigerwerte
(Nährstoffansprüche [N]: a = anitrophil–mässig nitrophil, n = ziemlich bis sehr nitrophil / Säureansprüche [A]: a = extrem–mässig acidophytisch, b = subneutrophytisch-basiphytisch / Toxitoleranz [T]: 1 = toxitolerant, 2 = ziemlich toxitolerant, 3 = ziemlich empfindlich, 4 = empfindlich, 5 = sehr empfindlich)

Table 1 Frequency of the lichen species in the investigation area and their ecological indicator value
(Nutrient requirements [N]: a = anitrophytic to moderate nitrophytic, n = rather to very nitrophytic / Acidity requirements [A]: a = extremely to moderate acidophytic, b = subneutrophytic to basidophytic / Toxitolerance [T]: 1 = toxitolerant, 2 = rather toxitolerant, 3 = rather sensitive, 4 = sensitive, 5 = very sensitive)

Art	Frequenz (%)	N	A	Q-Wert	T
Frequenzklasse IV:					
Parmelia sulcata	73.3	n	a-b	9.46	2
Buellia punctata-Gruppe	70.2	a-n	a	9.11	2
Krusten	63.4	–	–	9.66	2
Frequenzklasse III:					
Hypogymnia physodes	58.0	a	a	8.51	1
Lecanora conizaeoides	54.2	a-n	a	7.35	1
Candelariella xanthostigma	54.2	a-n	a	10.54	2
Pseudevernia furfuracea	51.1	a	a	8.55	1
Parmelia tiliacea	50.4	n	a-b	11.52	3
Physcia tenella	41.2	n	a-b	11.41	3
Frequenzklasse II:					
Parmelia subrudecta	38.2	a	a	12.12	3
Physcia adscendens	37.4	n	a-b	11.04	3
Phaeophyscia orbicularis	35.9	n	a-b	11.74	3
Parmelia flaventior	30.5	a-n	a	12.55	4
Parmelia exasperatula	23.7	n	a-b	10.58	3
Parmelia elegantula	22.1	a-n	a	13.79	5
Physconia grisea	22.1	n	b	12.38	4
Frequenzklasse I:					
Parmelia subaurifera	19.1	a	a	13.12	4
Xanthoria parietina	13.0	n	b	13.41	4
Candelaria concolor	11.5	n	b	12.60	4
Hypogymnia tubulosa	10.7	–	a-b	13.86	5
Evernia prunastri	9.9	a	a	13.46	4
Lecanora chlarotera	9.9	–	a-b	14.54	5
Lecidella eleachroma-Gruppe	6.9	–	a-b	14.33	5
Parmelia acetabulum	6.9	n	a-b	11.11	3
Parmelia glabratula	6.1	a-n	a	14.38	5
Xanthoria fallax	6.1	n	b	15.38	5

Weitere Arten (meist in weniger als 5% der Aufnahmen): *Bryoria* cf. *fuscescens*, *Hypogymnia farinacea*, *Lecanora allophana*, *L. carpinea*, *L. muralis*, *L. pulicaris*, *L.* cf. *saligna*, *L.* spec., *Opegrapha* spec., *Parmelia caperata*, *P. saxatilis*, *Parmeliopsis ambigua*, *Pertusaria albescens*, *Platismatia glauca*, *Ramalina farinacea*, *Usnea* spec., *Xanthoria candelaria*.

80% der Aufnahmen (Frequenzklasse V) vor. In die Frequenzklasse IV gehörten Flechten der *Buellia punctata*-Gruppe und die Blattflechte *Parmelia sulcata* (Bild 3) sowie «Krusten», die in belasteten Gebieten vorkommen. In 40 bis 60% aller Aufnahmen kamen Flechten wie *Candelariella xanthostigma, Hypogymnia physodes, Lecanora conizaeoides* und andere vor, die ebenfalls als toxitolerant gelten. Empfindliche Arten, wie zum Beispiel *Ramalina farinacea* oder *Usnea* spec., kamen nur in 0 bis 20% der Aufnahmen vor. Anitrophile Arten gehörten meist zur Frequenzklasse I. Diese Arten, z. B. *Parmelia caperata, Hypogymnia farinacea, Ramalina farinacea* oder *Evernia prunastri,* sind meist auch schadstoffempfindlich. Die meisten Frequenzklassen wurden von Arten dominiert, die extrem bis mässig acidophytische Verhältnisse lieben. Subneutrophytische bis basiphytische Verhältnisse bevorzugen nur wenige im Untersuchungsgebiet gefundene Arten, z. B. *Physconia grisea, Lecanora muralis* (eigentlich eine Gesteinsflechte), *Xanthoria fallax* und *Xanthoria parietina.*

Von den insgesamt 31 Standorten im Untersuchungsgebiet gehörten 10 mehrheitlich in die Assoziation des Lecanoretum conizaeoidis Barkman (Bild 4). Diese Gesellschaft konnte im Untersuchungsgebiet nur von Zürich seeaufwärts bis Wädenswil festgestellt werden. Demgegenüber wurde die Assoziation des Parmelietum caperatae Felföldy vor allem im südöstlichen Seeteil an sechs Standorten bestimmt. Die gegenüber Luftverschmutzung empfindliche Charakterart *Parmelia caperata* war nur an zwei Standorten anzutreffen und wurde vor allem durch die weniger empfindliche, aber wärmebedürftigere

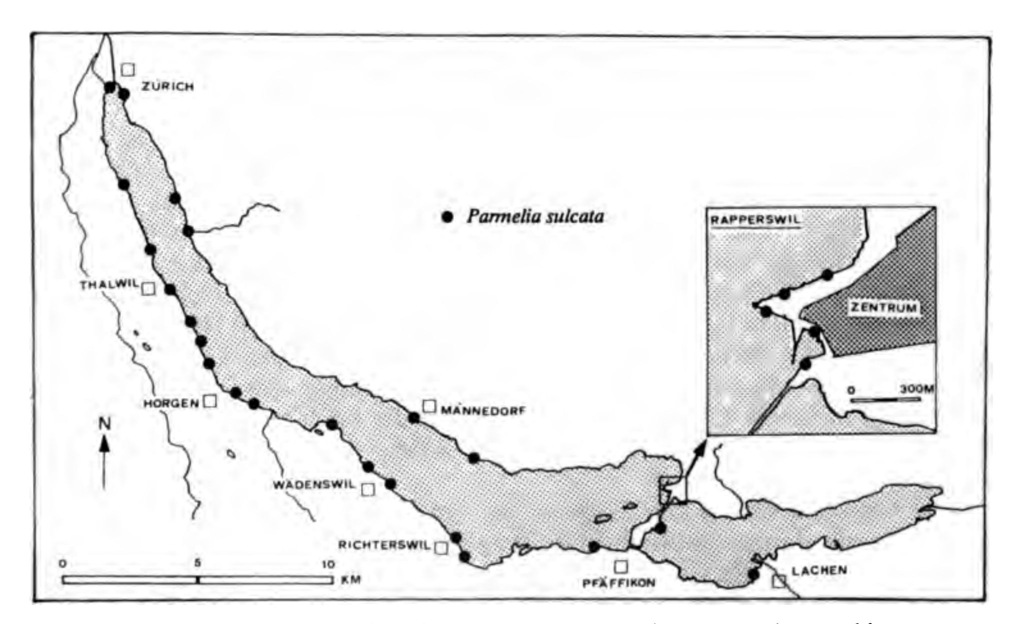


Bild 3 Verbreitung von *Parmelia sulcata* an Rosskastanien im Untersuchungsgebiet
Fig. 3 Distribution of *Parmelia sulcata* on horse-chestnut trees in the investigation area

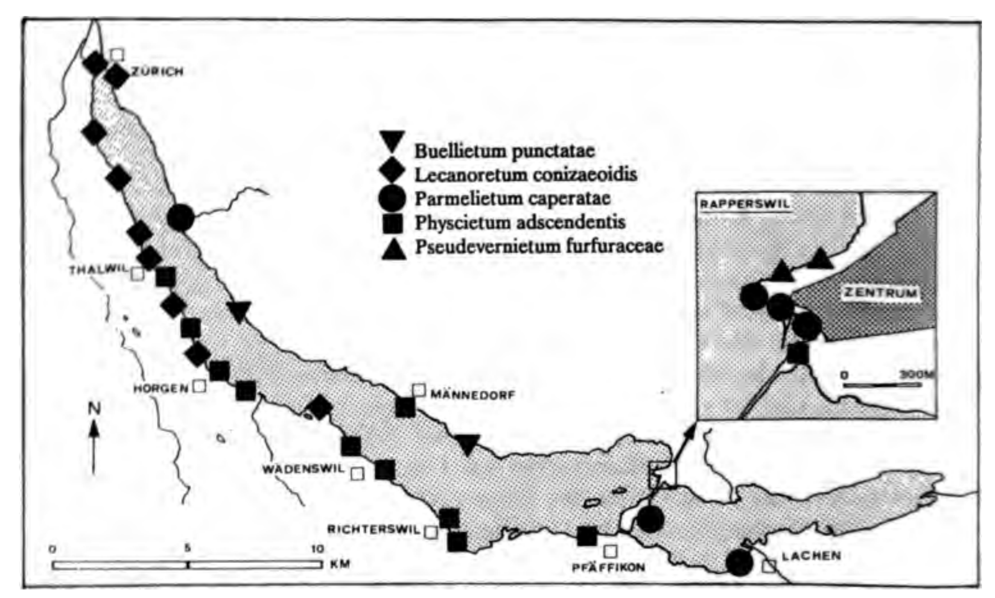


Bild 4 **Dominierende Flechtengesellschaften der Standorte im Untersuchungsgebiet**

Fig. 4 **Dominant lichen communities of each site in the investigation area**

Parmelia flaventior ersetzt (Bild 5). Am meisten Standorte wurden vom Physcietum adscendentis Frey & Ochsner dominiert, dessen Charakterarten im Untersuchungsgebiet eutrophierungstolerant sind. Während im unteren Seeteil vor allem *Physcia adscendens* und *Physcia tenella* als Charakterarten vorherrschten, war es im übrigen Untersuchungsgebiet meist *Physconia grisea*. Zur Assoziation des Buellietum punctatae gehörten die Standorte in Herrliberg und Stäfa. Die einzige Charakterart ist *Buellia punctata*, die als toxitolerant betrachtet wird. Drei Standorte wurden vom Pseudevernietum furfuraceae Hilitzer dominiert. In Rapperswil (21, 22) hatte die Charakterart *Pseudevernia furfuracea* eine geringe Deckung von 2,2 bzw. 4,3% erreicht, so dass von einer verarmten Gesellschaft gesprochen werden kann. In Horgen (11) lag die Deckung mit *Pseudevernia furfuracea* unter einem Prozent.

Der Durchschnitt der Arten(-gruppen) pro Standort erreichte mit durchschnittlich mehr als 15 Arten pro Einzelbaum die höchsten Werte in Lachen (20) und Rapperswil (21, 22). Die geringste Artenzahl wurde in Thalwil beobachtet (Tabelle 2).

Die Gesamtdeckung der Flechten lag pro Baum zwischen 1% und 80%. Die geringste durchschnittliche Deckung wurde in Horgen (11) beobachtet, hohe Werte wurden in Lachen (20), Rapperswil (21, 22) und auf der Halbinsel Au mit über 60% erfasst.

Der aus der Gesamtdeckung und der Artenzahl berechnete Flechtenindex lag im Untersuchungsgebiet zwischen 0,1 und 11,7 (Bild 6). An den drei

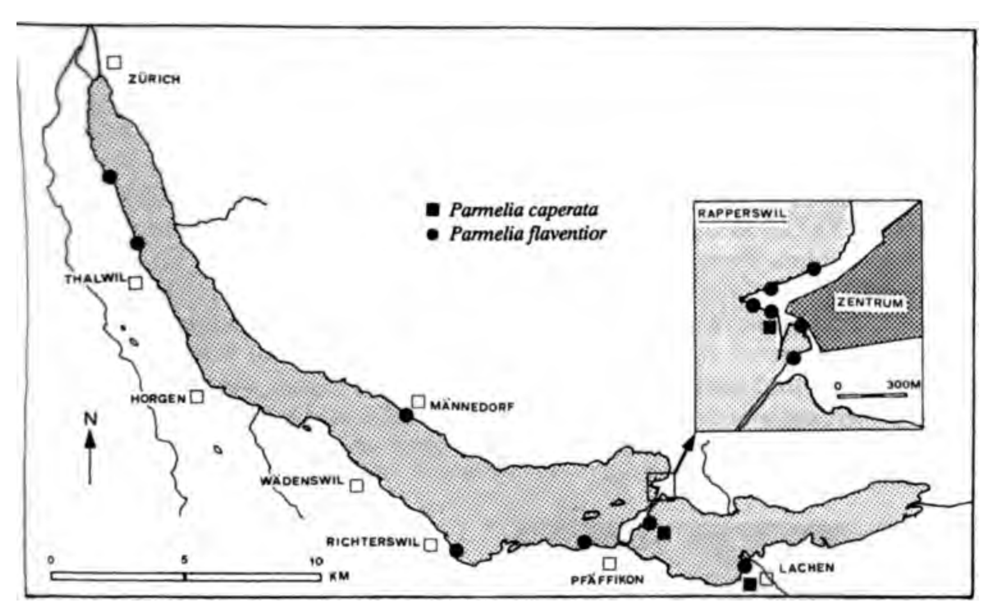


Bild 5 Verbreitung von *Parmelia caperata* und *P. flaventior* an Rosskastanien im Untersuchungsgebiet

Fig. 5 Distribution of *Parmelia caperata* and *P. flaventior* on horse-chestnut trees in the investigation area

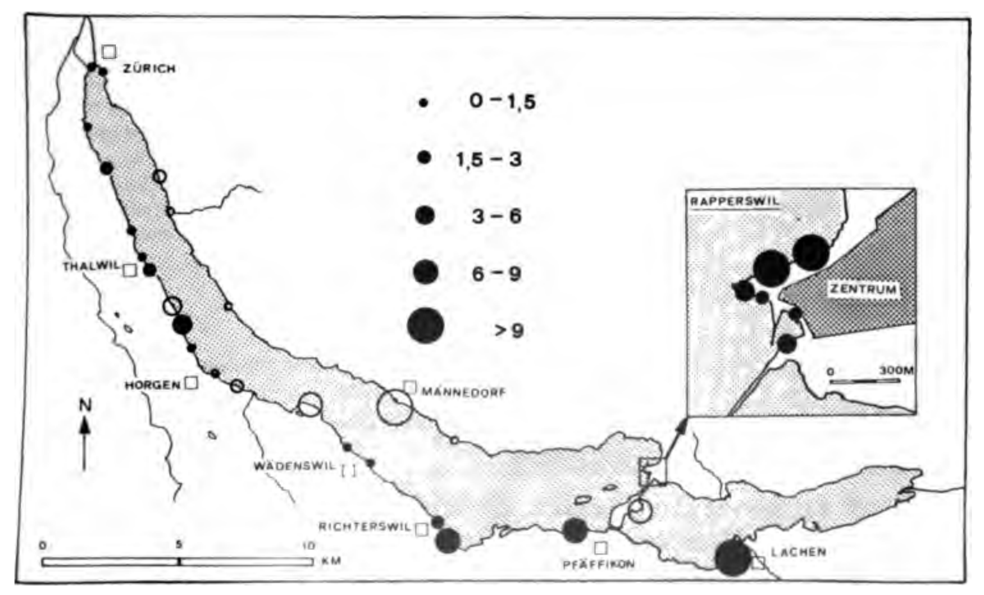


Bild 6 **Flechtenindex** (Standorte mit weniger als 4 untersuchten Trägerbäumen sind mit Kreissymbolen gekennzeichnet)

Fig. 6 **Lichen index** (sites with less than four examined trees are indicated with circles)

Standorten in Zürich lag er unter 1 (Bild 7), ebenso in einigen Seegemeinden. Erst ab den Standorten südöstlich von Wädenswil lag der Flechtenindex durchwegs über 1 und erreichte maximale Werte von mehr als 10 in Rapperswil (Standorte 21, 22) sowie in Lachen (20). Aber auch für die Standorte auf der Halbinsel Au (13), in Richterswil (17), Männedorf (33) und in Pfäffikon (18) wurden relativ hohe Flechtenindizes ermittelt (FI: 7–10). Auffällig war die starke Variation der Flechtenindizes in Rapperswil: Die Standorte nördlich vom Schloss Rapperswil (21, 22) erreichten Werte über 10; an zentrumsnahen Standorten sank der Flechtenindex bis auf 3 und erreichte am Seedamm wieder einen Wert von über 6. Ähnliche Verhältnisse waren in Wädenswil und Richterswil zu beobachten: Auf der Halbinsel Au betrug der Flechtenindex 8,25 und sank in Richtung Wädenswil bis unter 1 in Zentrumsnähe. Dieser Wert entsprach demjenigen der Stadt Zürich. In Richterswil stieg der Flechtenindex vom zentrumsnahen (16) zum etwas ausserhalb liegenden Standort (17) von 2 auf 7,7 an.

Bild 7 Flechtenarme Alleebäume in Zürich (Standort 2)

Fig. 7 Trees with a poor lichen vegetation along an avenue in Zurich (location 2)

Die zur Einteilung der Standorte ermittelten Parameter zeigten ein ähnliches Bild wie der Flechtenindex: Die Deckung der Blatt-, Strauch- und Bartflechten nahm seeaufwärts stark zu und zeigte eine Tendenz zu höheren Dekkungsgraden ausserhalb von zentrumsnahen Gebieten.

Die Thalluslängen und -durchmesser variierten im Untersuchungsgebiet stark. In Zürich lagen die durchschnittlichen Längen der Strauch- und Bart-

chten unter 10 mm, die Durchmesser der Blattflechten unter 30 mm. Ein utlicher Gradient in südöstlicher Richtung konnte bei der Blattflechte *Par-elia tiliacea* beobachtet werden (Bild 8): Während in Rüschlikon nur ein urchmesser von 15 mm festgestellt wurde, waren insbesondere im oberen eteil die Bäume häufig flächig mit dieser Blattflechte bewachsen; sie er-ichte hier Durchmesser von über 100 mm.

belle 2 Flechtendaten der untersuchten Standorte
= Anzahl Aufnahmen / %D = Gesamtdeckung mit Flechten in % / AZ = Artenzahl / FI = chtenindex / DS = Deckung mit Strauch- und Bartflechten in % / DB = Deckung mit Blatt-chten in % / SG = Schädigungsgrad der Blatt- und Strauchflechten in % der Thallusfläche / = Flechtenzone)

ble 2 Lichen parameters of the studied sites
= number of plots / %D = total lichen cover in % / AZ = number of species / FI = lichen lex / DS = cover of fruticose and beard lichens in % / DB = cover of foliose species in % / = degree of damage of foliose and fruticose species in % of the thallus surface / Z = lichen nation)

r.	Standort	N	%D	AZ	FI	DS	DB	SG	Z
1	Zürich-Utoquai	20	10	5.6	0.6	0.5	0.6	18	5
2	Zürich-Bürkliplatz	8	14	4.1	0.6	0.4	0.4	14	6
3	Zürich-Wollishofen	4	31	2.8	0.9	0	0	–	6
4	Kilchberg-Mönchhof	8	23	8.6	1.9	0.2	6.8	40	4
5	Rüschlikon-Schiffstation	4	28	4.3	1.3	0	5.3	60	4
6	Thalwil-Ludretikon	4	4	1.8	0.1	0	1.9	100	5
7	Thalwil-Schiffstation	4	18	6.3	2.6	0.1	5	15	4
8	Oberrieden-Tischenloo	1	30	12	3.6	0.5	5	15	4
9	Oberrieden-Strandbad	4	30	9.3	3.1	1.1	12.5	19	4
0	Oberrieden-Seepolizei	1	20	6	1.2	0	0.5	10	6
1	Horgen-Sust	1	1	6	0.1	0.5	0.5	20	5
2	Horgen-Talacker	3	33	7	2.3	0.7	15	65	4
3	Au-Schiffstation	1	75	11	8.3	0	25	25	3
4	Wädenswil	2	15	9	1.4	0	9.5	30	4
5	Wädenswil-Schiffstation	6	10	6.5	0.8	0.3	4.8	26	5
5	Richterswil-Schiffstation	6	22	8	2	0.3	10.8	34	4
7	Richterswil	8	54	14	7.7	0.1	34.1	24	3
	Pfäffikon	4	49	15	7.2	0	42.5	8	3
	Hurden	3	59	12	6.8	0.8	33.3	32	3
	Lachen	6	72	16	12	1.1	66.7	9	2
	Rapperswil-1	4	70	15	11	3	71.3	16	2
	Rapperswil-2	4	65	17	11	2.4	67	16	2
	Rapperswil-3	4	51	12	5.8	2.3	40	16	3
	Rapperswil-4	4	28	9.8	2.9	0	23	34	4
	Rapperswil-5	4	23	11	2.9	0.3	13.3	22	4
	Rapperswil-6	4	40	14	6.2	0.5	28.5	33	3
	Küsnacht	1	20	8	1.6	0.5	5	20	4
	Küsnacht	2	13	9	1.2	0.3	4	30	4
	Herrliberg	2	20	2.5	0.7	0	0	–	6
	Männedorf-Schiffstation	3	73	13	9.8	0	40	17	3
	Stäfa-Schiffstation	1	15	4	0.6	0	0.5	10	6

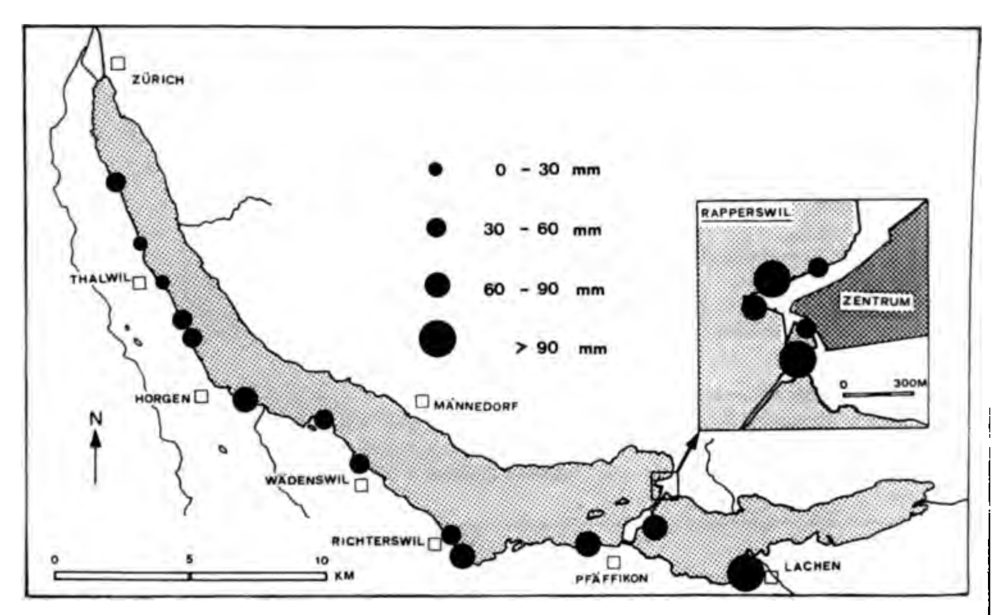


Bild 8 Durchschnittliche Thallusdurchmesser von *Parmelia tiliacea*

Fig. 8 Mean diameter of the thalli of *Parmelia tiliacea*

Schädigungen an den Flechten konnten im ganzen Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Die höchsten Schädigungsgrade wurden in Thalwil, Horgen und Rüschlikon beobachtet. Weniger als 10% geschädigt waren die Blatt-, Strauch- und Bartflechten in Pfäffikon und Lachen.

Der sehr stark belasteten Zone wurden die Standorte in Zürich (2, 3), Oberrieden (10), Herrliberg (32) und Stäfa (34) zugeordnet (Bild 9). Stark belastete Zonen wurden in Zürich (1), Thalwil (6), Horgen (11) und Wädenswil (15) festgestellt. Mittel bis stark belastete Zonen waren im ganzen Untersuchungsgebiet vertreten. Die mittel belastete Zone kam erst ab der Halbinsel Au (13) seeaufwärts vor. Schwach belastete Zonen waren in Rapperswil (21, 22) und Lachen (20) vorhanden. In die Zone 1, ohne Belastung, konnte kein Untersuchungsstandort eingeteilt werden.

Bei der grossräumigen Zonierung des Untersuchungsgebietes in Abschnitte von fünf Kilometern (Bild 9) konnte eine deutliche Tendenz zu weniger stark belasteten Zonen seeaufwärts festgestellt werden: Stark belastete Zonen reichen bis zur Halbinsel Au. Weiter seeaufwärts folgt ein langsamer Übergang bis zur schwach belasteten Zone um Lachen.

5 Diskussion

In früheren Untersuchungen ist die Rosskastanie als Trägerbaum für das Biomonitoring mit Flechten selten berücksichtigt worden. Das mag daran liegen,

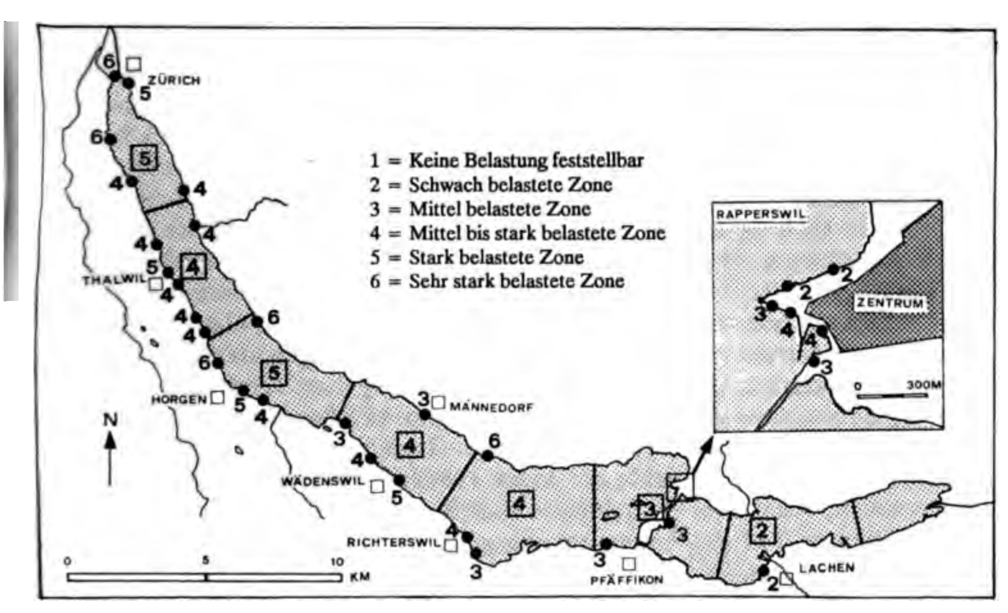


Bild 9 Zuordnung der Standorte zu den Flechtenzonen und Zoneneinteilung der einzelnen Seeabschnitte

Fig. 9 Attribution of the sites to lichen zones and zonation of the different lake sections

dass die Besiedlung der Rosskastanie mit Flechten besonders günstige mikroklimatische Verhältnisse erfordert (G.A. Ritschel, 1976: 39). Diese waren im Untersuchungsgebiet wegen der unmittelbaren Seenähe und der dadurch erhöhten Luftfeuchtigkeit gegeben. Inwiefern die Azidität der Borke von Rosskastanien die Besiedlung durch Flechten beeinflusst, ist noch unklar. Möglicherweise ist die Rinde, die durch sauer reagierende Luftschadstoffe zusätzlich angesäuert wird, der Grund, wieso in belasteten Gebieten meist nur noch acidophytische Arten wie *Hypogymnia physodes, Parmelia sulcata, Pseudevernia furfuracea* oder *Lecanora conizaeoides* vorkommen. Baumarten mit weniger sauren Borken weisen bei gleicher Belastung meist eine besser entwickelte Flechtenvegetation auf als Rosskastanien. An einer Pappel fand G.A. Ritschel (1976) am See in der Stadt Zürich empfindliche Arten wie *Anaptychia ciliaris, Physcia aipolia, Parmelia saxatilis* oder *P. acetabulum*, die in der vorliegenden Erhebung an Rosskastanien nicht oder erst weiter seeaufwärts gesichtet wurden.

Pseudevernia furfuracea war an Standorten in der Stadt Zürich häufig vertreten, wenn auch mit verkümmerten Thalli. Gut entwickelt war sie nur in Rapperswil, hinter dem Schloss, wo neben einer geringen Luftbelastung auch die feuchtkalten Klimabedingungen für diese hygrophytische Strauchflechte optimale Bedingungen bieten. Wahrscheinlich ist diese Art relativ toxitolerant, zeigt jedoch schon bei geringer Schadstoffbelastung eine verminderte

talität. Die Funde in Zürich stimmten mit den Angaben von G.A. Ritschel (1976) überein, die eine weite Verbreitung dieser Flechte im Stadtgebiet festgestellt hat. Im Gegensatz dazu hat S. Züst (1977) keine weite Verbreitung von *Pseudevernia furfuracea* festgestellt. Im Vergleich mit den Flechten an Rosskastanien am Quai in Luzern (E. Ruoss & C. Keller, 1988) ist aufgefallen, dass die toxitoleranten Arten *Pseudevernia furfuracea* wie auch *Lecanora conizaeoides* dort deutlich weniger häufig vorgekommen sind als im Zürichseegebiet.

Die Blattflechte *Physconia grisea*, am Luzerner Quai eine der häufigsten Flechtenarten, hatte im Untersuchungsgebiet keine weite Verbreitung: Grössere Deckungsgrade waren erst ab Richterswil seeaufwärts, also im südöstlichen Teil aufgetreten. Da die klimatischen Bedingungen der untersuchten Bäume am Luzerner Quai und im Untersuchungsgebiet vergleichbar waren, ist anzunehmen, dass die Schadstoffbelastung im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes diejenige am Luzerner Quai übertrifft und sie so dieser ziemlich toxitoleranten Flechte (V. Wirth, 1980) die Besiedlung der Rosskastanie erschwert. Ähnliches trifft für die Blattflechte *Parmelia flaventior* zu, die im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes mit deutlich erhöhten Deckungsgraden auftrat. Dieser Art scheint das feuchtmilde Seeklima an lichtreichen Standorten zu behagen (Bild 10).

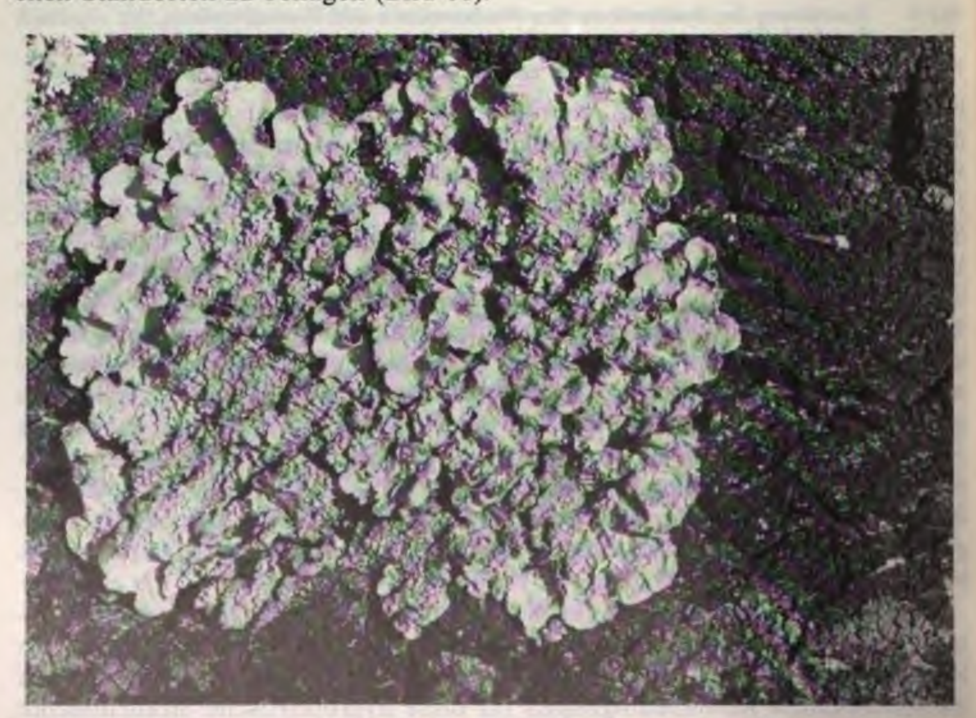


Bild 10 *Parmelia flaventior*, eine typische Flechtenart an feuchtmilden Standorten in Seenähe
Fig. 10 *Parmelia flaventior*, a typical species of humid and warm sites close to the shore

Nur selten kommen an den untersuchten Rosskastanien Bartflechten vor. Juvenile Kümmerformen von *Bryoria* cf. *fuscescens* und *Usnea* spec. wurden nur in Zürich (1) und Rapperswil (21, 22) gefunden. Die Luftschadstoffbelastung dürfte im Untersuchungsgebiet für die Besiedlung der Trägerbäume mit den empfindlichen Bartflechten zu hoch sein. Andere empfindliche Arten, wie *Ramalina farinacea* oder *Parmelia caperata*, die nur im Raum Rapperswil bis Lachen gefunden worden sind, deuten auf eine relativ geringe Belastung in diesem Gebiet hin. Dort ist auch die nach V. Wirth (1988) empfindliche Flechtengesellschaft des Parmelietum caperatae häufig zu finden. Die Schadstoffempfindlichkeit von *Parmelia caperata* und ihre Eignung als Bioindikator für Luftverunreinigungen wurden bereits von J. Marti (1985) erwähnt. Im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind vor allem Gesellschaften gefunden worden, die auf eine stärkere Belastung hinweisen. Die dort am häufigsten vorkommende Gesellschaft des Lecanoretum conizaeoidis besiedelt ziemlich bis extrem saure Rinde von Laub- und Nadelbäumen und ist sehr toxitolerant (E. Kupfer-Wesely & R. Türk, 1987).

Die Ökotoxitoleranzfaktoren weichen zum Teil stark von jenen anderer Untersuchungen ab, was u. a. auf den unterschiedlichen Flechtenreichtum der Untersuchungsgebiete, klimatische Unterschiede und andere Aufnahmemethoden zurückzuführen ist.

Der Flechtenindex zeigt im Untersuchungsgebiet einen deutlichen Gradienten von einer schlecht entwickelten Flechtenvegetation im nordwestlichen Teil zu einer besser entwickelten Flechtenvegetation im südöstlichen Teil. Von einer optimal entwickelten Flechtenvegetation kann aber auch dort nicht gesprochen werden, da empfindliche Arten nur selten und mit geringer Dekkung vorkommen. Aufgefallen sind die Gradienten des Flechtenindexes von zentrumsnahen (stärker belasteten) Standorten zu Standorten ausserhalb der Gemeindezentren, die weniger stark belastet sind (z. B. in Rapperswil, Richterswil und Wädenswil). Während in Zürich alle Standorte einen Flechtenindex von weniger als eins erreicht haben, konnte bei der Untersuchung am Luzerner Quai (E. Ruoss & C. Keller, 1988), wo mit einer ähnlichen Methode ein Flechtenindex ermittelt worden ist, noch ein deutlicher Gradient des Indexes im Stadtgebiet festgestellt werden. Das unterschiedliche Verhalten des Flechtenindexes lässt sich dahingehend interpretieren, dass in Zürich, wo kein Gradient ersichtlich ist, die Flechten einer grossräumigen Schadstoffbelastung ausgesetzt sind, während in Luzern oder in Rapperswil die Belastungen innerhalb der Städte noch stark variieren.

Auch bei der Flechtenzonierung in Belastungsstufen hat sich ein Gradient von (sehr) stark belasteten Gebieten im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes zu weniger stark belasteten Gebieten im südöstlichen Teil ergeben. Verantwortlich für den Gradienten ist vor allem die unterschiedliche Bedeckung der Trägerbäume mit Blatt- und Strauchflechten, da dieser Parameter in den Zonierungskriterien am stärksten gewichtet wird. Weil die Schä-

digung der Flechten als Zonierungskriterium berücksichtigt wurde, konnte keine unbelastete Zone – ohne geschädigte Flechten – ausgeschieden werden.

Die Flechtenzonierung eignet sich gut für die rasche Erfassung der Belastungssituation eines grösseren Gebietes, da für die Zonierung in Belastungsstufen nur wenige Indikatorarten bestimmt werden müssen. Der Wert des Flechtenindexes alleine erlaubt keine direkten Rückschlüsse auf die Belastung der Flechtenvegetation durch Luftschadstoffe.

Eine Gegenüberstellung von Flechtenzonen und Flechtenindex zeigt, dass in den (sehr) stark belasteten Zonen (5 und 6) die Indexwerte kleiner als 1,3 sind. Die mittel bis stark belastete Zone weist Werte zwischen 1,2 und 4, die mittel belastete zwischen 5 und 10 und die schwach belastete solche von mehr als 10 auf.

Die zeitaufwendigere Methode zur Ermittlung eines Flechtenindexes kann durch ihren Gehalt an floristischen Angaben die Interpretation der Flechtenzonierung beträchtlich erleichtern und ergänzende Angaben zur (immissions-) ökologischen Charakterisierung eines Gebietes geben.

Die Beeinträchtigung der Flechtenvegetation im Untersuchungsgebiet kann kaum durch die Wirkung eines einzelnen Luftschadstoffes erklärt werden. Am stärksten beeinträchtigt wird die Flechtenvegetation an Standorten, die sowohl dicht besiedelt sind als auch den Immissionen stark befahrener Strassen ausgesetzt sind (z.B. Zürich, Wädenswil-Zentrum, Rapperswil-Zentrum). Dort liegen die Schwefeldioxidkonzentrationen höher als in weniger dicht besiedelten Gebieten, und die Stickstoffdioxidkonzentrationen überschreiten die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung. In dünn besiedelten Gebieten mit viel motorisiertem Strassenverkehr sind weniger starke Beeinträchtigungen der Flechtenvegetation beobachtet worden, obwohl auch dort die NO_2-Konzentrationen im Jahresmittel zum Teil beträchtlich über dem Grenzwert von 30 $\mu g/m^3$ liegen.

Die Flechtenvegetation im Untersuchungsgebiet ist um so besser ausgebildet, je tiefer die SO_2-Konzentration ist. Dieser Schadstoff kann jedoch die Beeinträchtigungen in Gebieten mit Konzentrationen unter 15 $\mu g/m^3$ im Jahresmittel nur zum Teil erklären. Betrachtet man die Toxitoleranzreihen verschiedener Autoren (z.B. D.L. Hawksworth & F. Rose, 1970), so stellt man fest, dass bei solch tiefen Schwefeldioxidkonzentrationen die meisten empfindlichen Arten ohne weiteres überleben können. Wahrscheinlich wird die Schädigung durch Synergieeffekte von SO_2 und NO_2 verstärkt, so dass bereits geringe Konzentrationen zu einer Beeinträchtigung der Flechtenvegetation führen (z. B. V. Wirth, 1988).

Eine besser entwickelte Flechtenvegetation ist in den weniger dicht besiedelten Gebieten des Untersuchungsgebietes festzustellen, wo in der Regel höhere Ozonkonzentrationen gemessen werden als in Städten. Bei einer geringen Schädigung der Flechtenvegetation kann demzufolge nicht auf unbelastete Gebiete geschlossen werden. Vielmehr ist anzunehmen, dass sich Flechten weniger als Indikatoren für Ozonimmissionen eignen. Weitere Untersuchun-

gen zur Auswirkung von Ozon auf Flechten sind notwendig. Auch der Einfluss von weiteren Faktoren, v. a. des Mikroklimas, auf die Flechtenvegetation ist noch weitgehend unbekannt und bedarf weiterer Abklärungen.

Ob sich allein aufgrund der Verbesserung der lufthygienischen Verhältnisse eine gesunde und artenreiche Flechtenvegetation entwickelt, wird erst eine spätere Überprüfung der vorliegenden Ergebnisse nach dem Vollzug der Richtlinien der Luftreinhalteverordnung (LRV) zeigen.

6 Literatur

Arbeitsgemeinschaft Bioindikation (1989), Flechtenuntersuchungen im Kanton Luzern. Teilprojekt B. Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung. Luzern, 122 Seiten.

Barkman, J. J. (1958), Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes. Assen, 628 Seiten.

Braun-Blanquet, J. (1928), Pflanzensoziologie. Grundzüge einer Vegetationskunde. 1. Aufl., Berlin, 330 Seiten.

Britt, H. (1986), Flechtenkartierung in Winterthur. Diplomarbeit, Geogr. Inst. Univ. Zürich, 121 Seiten.

Clerc, P. & P.-D. Roh (1980), Les lichens, indicateurs biologiques de la pollution atmosphérique, autour de la fabrique d'aluminium de Martigny (Valais, Suisse). Saussurea *11*: 107–139.

Guderian R., Küppers, K. & R. Six (1985), Wirkung von Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid auf Fichte und Pappel bei unterschiedlicher Versorgung mit Magnesium und Kalzium sowie auf die Blattflechte *Hypogymnia physodes*. VDI-Bericht *560*: 657–703.

Hawksworth, D. L. & F. Rose (1970), Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. Nature *227*: 145–148.

Hawksworth, D. L. & F. Rose (1976), Lichens as pollution monitors. Studies in Biology *66*, Edward Arnold, London, 60 Seiten.

Herzig, R., Liebendörfer, L. & M. Urech (1985), Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung in der Schweiz – Methodenentwicklung in der Region Biel-Seeland. Lizentiatsarbeit, Syst.-Geobot. Inst. Univ. Bern, 214 Seiten.

Herzig, R. & M. Urech (1988), Flechten als Bioindikatoren: Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland. Diss. Univ. Bern, 279 Seiten.

John, V. (1986), Tote Bäume und lebende Flechten – ein Phänomen der neuartigen Waldschäden. Allg. Forstzeitschrift, Nr. *1/2* (Sonderdruck), 2 Seiten.

Kupfer-Wesely, E. & R. Türk (1987), Epiphytische Flechtengesellschaften im Traunviertel (Oberösterreich). Stapfia *15*, 138 Seiten.

Kupfer-Wesely, E. & R. Türk (1988), Epiphytische Flechtenvereine auf Birn- und Apfelbäumen im Traunviertel/Oberösterreich. Sauteria *1*.

Le Blanc, F. & J. De Sloover (1970), Relation between distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. Can. J. Bot. *48*: 1485–1496.

Marti, J. (1985), Die Toxizität von Zink, Schwefel- und Stickstoffverbindungen auf Flechten-Symbionten. Diss. Univ. Zürich, 128 Seiten.

Mc Cune, B. (1988), Lichen communities along O_3 and SO_2 gradients in Indianapolis. Bryologist *91*: 223–228.

Moberg, R. (1977), The lichen genus *Physcia* and allied genera in Fennoscandia. Symb. Bot. Upsal. *XXII*: 1, Uppsala, 108 Seiten.

Nash, T. H. (1976), Sensitivity of lichens to nitrogen dioxide fumigations. Bryologist *79*: 103–106.

Nash, T. H. & L. L. Sigal (1979), Gross photosynthetic response of lichens to short-time ozone fumigation. Bryologist *82*: 280–285.

Peter, K. (1988), Flechtenkartierung als Grundlage für die Charakterisierung der Luftbelastung (Bündner Rheintal). Geographica Helvetica *2*: 99–104.

Ritschel, G. A. (1976), Neue und wenig beachtete epiphytische Flechten im Stadtgebiet von Zürich. Herzogia *4*: 33–46.

Ritschel, G. A. (1977), Verbreitung und Soziologie epiphytischer Flechten in Nordwestbayern. Bibliotheca lichenologica *7*, 192 Seiten.

Ruoss, E. & C. Keller (1988), Flechtenuntersuchungen im Kanton Luzern, Teilprojekt A: Flechteninventar. 1. Zwischenbericht, Luzern, 26 Seiten.
Schüepp, M. (1960), Lufttemperatur, 1. Teil. Klimatologie der Schweiz: C. Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteorol. Zentralanst. Zürich, 14 Seiten.
Schüepp, M. (1979), Meteorologische und hydrologische Verhältnisse. Der Zürichsee und seine Nachbarseen, Verlag der Neuen Zürcher Zeitung: 35–60.
Türk, R., Wirth, V. & O.L. Lange (1974), CO_2-Gaswechsel-Untersuchungen zur SO_2-Resistenz von Flechten. Oecologia *15*: 33–64.
Türk, R. & M. Seger (1984), Immissionsökologische Studie über den epiphytischen Flechtenbewuchs im Raum Klagenfurt. Forschungen zur Umweltsituation in Klagenfurt, Klagenfurter Geographische Schriften *5*: 25–41.
Türk, R. (1988), Bioindikation von Luftverunreinigungen mittels Flechten. Ökophysiologische Probleme durch Luftverunreinigungen, Inst. f. Pflanzenphysiologie, Karl-Franzens-Univ. Graz: 13–27.
Uttinger, H. (1965), Niederschlag. 1. Teil. Klimatologie der Schweiz: E. Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteorol. Zentralanst., Zürich, 124 Seiten.
Vareschi, V. (1936), Die Epiphytenvegetation von Zürich. Ber. d. Schweiz. Bot. Ges. *44*: 445–488.
Vonarburg, C. (1989), Die Flechten an Alleebäumen am Zürichsee – Ein Beitrag zur Beurteilung der Luftschadstoffbelastung im Zürichseegebiet. Diplomarbeit, Geogr. Inst. Univ. Zürich, 71 Seiten.
Wirth, V. (1972), Die Silikatflechten-Gemeinschaften im ausseralpinen Zentraleuropa. Dissertationes Botanicae *17*, Lehre, 306 Seiten.
Wirth, V. (1980), Flechtenflora: Ökologische Kennzeichnung und Bestimmung der Flechten Südwestdeutschlands und angrenzender Gebiete, 1. Aufl., Stuttgart, 552 Seiten.
Wirth, V. (1987), Die Flechten Baden-Württembergs: Verbreitungsatlas, Stuttgart (Hohenheim), 528 Seiten.
Wirth, V. (1988), Phytosociological approaches to air pollution monitoring with lichens. – Bryophites and Air Quality. Bibl. Lichenologica *30*: 91–107.
Wittmann, H. & R. Türk (1988), Immissionsbedingte Flechtenzonen im Bundesland Salzburg (Österreich) und ihre Beziehungen zum Problemkreis «Waldsterben». Ber: ANL *12*: 247–258.
Züst, S. (1977), Die Epiphytenvegetation im Raume Zürich als Indikator für die Umweltbelastung. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel Zürich, *62*, 113 Seiten.

Christian Vonarburg & Dr. Engelbert Ruoss, Natur-Museum Luzern, Kasernenplatz 6, 6003 Luzern
PD Dr. C.A. Burga, Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1990) *135/4*: 259–265

Schilfbestände als Habitatinseln von Vögeln[1]

Heinrich Schiess, Universität Zürich

1 Einleitung

Seit einigen Jahren lenken Ökologen ihre Aufmerksamkeit vermehrt auf die biogeographischen Fragestellungen nach Zeit und Raum und nach deren Einfluss auf Flora und Fauna. Massgebliche Impulse gingen dabei von amerikanischen Autoren aus, welche die Grösse von Inseln und den Grad ihrer Isoliertheit als bestimmende Faktoren für die Anzahl vorkommender Arten erkannten. Nach R.H. MacArthur und E.O. Wilson (1963, 1967) gibt es für jede Insel, entsprechend ihrer Fläche und ihrer geographischen Lage, einen Gleichgewichtszustand, in dem sich Aussterbe- und Einwanderungsrate von Tierpopulationen die Waage halten. In diesem Gleichgewichtszustand pendelt die Artenzahl um ein konstantes Niveau. Je kleiner eine Insel ist, und je weiter entfernt sie von einer Quelle potentieller Kolonisation liegt, desto geringer ist einerseits die Wahrscheinlichkeit, dass sie gefunden und besiedelt wird; andererseits erreichen etablierte Populationen auf kleinen Inseln nur bescheidene Individuenstärken, so dass sie in vermehrtem Masse gefährdet sind, bei zufälligen Bestandesschwankungen auszusterben. Die Anzahl vorkommender Arten sinkt deshalb mit zunehmender Isolation und abnehmender Fläche.

Die Inseltheorie ist seitdem Gegenstand und Ausgangspunkt zahlreicher Untersuchungen geworden. Ihre Voraussagen wurden an Pflanzen und vielen Tiergruppen geprüft und weiterentwikkelt. In einigen Arbeiten wurden gleichartige, aber voneinander isolierte Habitate auf dem Festland als Insel-Analoga aufgefasst. Die neuen Erkenntnisse wurden auch für die Planung von Reservaten eingesetzt.

Mit der hier auszugsweise vorgestellten Arbeit verfolgte ich das Ziel, die Faktoren zu beschreiben und zu erfassen, die für das Vorkommen der Brutvögel in den Schilfbeständen von Zürich- und Obersee eine Rolle spielen. Schilfbestände sind gefährdete Lebensräume, die infolge mannigfachster Ursachen immer seltener werden. Zudem sind sie von Natur aus verhältnismässig homogen und wenig variabel. Schilfröhricht stellt einen einfachen Modellfall für bedrohte natürliche und naturnahe Biotoptypen unserer Landschaft dar. Sie sind alle mehr oder weniger inselartig verteilt, und dies in ständig zunehmendem Mass. Inseltheoretische Überlegungen müssen daher auch im schweizerischen Naturschutz vermehrt berücksichtigt werden, wenn es um Bewertung und Planung potentieller Schutzgebiete geht. Neben den traditionellen Standortfaktoren war deshalb auch der Einfluss des Isolationsgrades auf die Schilfvögel zu prüfen.

Die Fragestellungen für meine Arbeit lauteten:

1. Welche ökologischen Parameter sind für die Reichhaltigkeit der Vogelwelt eines Schilfbestandes massgebend, und welche für das Vorkommen und die Häufigkeit der einzelnen Arten?
2. In welcher Weise und wie stark hängen die Vögel insbesondere von der Fläche der Schilfbestände ab?
3. Ist in diesem extremen Beispiel – hochmobile Vögel in einander nahe gelegenen Habitatinseln – der Isolationsgrad der Schilfbestände wirklich ohne Bedeutung?

Die Untersuchung versprach überdies eine umfassende Kartierung und eine gründliche ornithologische Bearbeitung aller Röhrichtflächen der Region.

[1] Auszug aus einer Diplomarbeit (1979) am Zoologischen Institut (Ethologie und Wildforschung) der Universität Zürich; publiziert in: Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Ber. Nr. 321

2 Inventarisierung der Schilfbestände

Es wurde versucht, möglichst alle im Untersuchungsgebiet liegenden Schilfflächen zu erfassen. Auf zwei Flügen (am 30. September und am 2. Oktober 1975) mit einem Sportflugzeug wurde fast das ganze Seeufer photographiert. Im Herbst sind ökologisch unterschiedliche Zonen (Bild 1) innerhalb der homogen scheinenden Schilfbestände auch phänologisch erkennbar (G. Lang, 1969), allerdings je nach Witterungsverlauf etwas früher oder später im Jahr. Die Flughöhe über Grund betrug zwischen 400 und 500 m, so dass sich mit dem verwendeten Objektiv von 55 mm Brennweite ein Abbildungsmassstab auf dem Film zwischen 1:7000 und 1:10 000 ergab. Um Form, Grösse und Struktur der Röhrichte genauer zu erfassen, ergänzte ich die Schrägaufnahmen durch Kartierungen und Photographien vom Ufer oder vom Boot aus. Im Seeuferbereich finden sich an manchen Orten Schilfbestände (SB), die keinen Wasseranstoss besitzen. Aufgrund dieses Kriteriums und der damit verbundenen ökologischen Verschiedenheit wurden sie von der engeren Untersuchung ausgeschlossen. Ihre Brutvögel wurden dagegen meist gleichwohl erfasst. Ebenso wurde mit schilfreicheren Riedflächen verfahren, die sich vor allem durch Dichte und Höhe der Schilfhalme klar von den vorgelagerten Formationen (Schilftypen 1–3) unterscheiden.

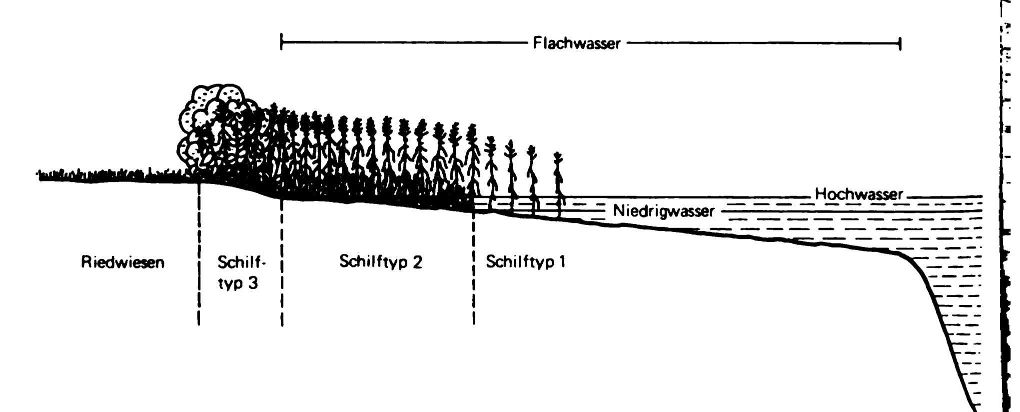


Bild 1 Vereinfachtes Profil eines naturnahen, schilfbestandenen Seeuferabschnitts. Charakterisierung der drei Schilftypen: 1 = ständig überschwemmt, Halme oft locker stehend; 2 = zeitweise überschwemmt, Grund oft schlammig, oft Dickicht alter Halme; 3 = nie überschwemmt, Vegetation vielfältiger.

Die Gesamtfläche der Schilfbestände an Zürich- und Obersee beträgt 27,4 Hektaren. Mit dem gewählten Minimalabstand von 20 m zwischen zwei als distinkt angesehenen Beständen verteilt sich diese Fläche auf 212 einzelne Objekte. Die kleinen Schilfbestände und jene mit vorwiegendem Schilftyp 1 sind in der Mehrzahl. Die Schilfbestände nehmen 23,92 km Uferlinie ein, was 25,4 Prozent der gesamten Uferlänge des Sees entspricht. Ein durchschnittlicher Schilfbestand misst 0,13 Hektaren und entlang der Uferlinie 113 m. Daraus ergibt sich bei einer mittleren Breite von 11,4 m ein mittleres Längen-/Breiten-Verhältnis von 10 : 1. Als Uferlinie wählte ich die in den amtlichen Übersichtsplänen angegebene Grenze der Uferparzellen, die mit Abweichungen von meist wenigen Metern der Wassergrenze bei mittlerem Hochwasserstand entspricht.

3 Brutvogelbestände

Im ganzen Untersuchungsgebiet wurden 1976 1816 Paare von in den Schilfbeständen brütenden Vogelarten festgestellt, die Stockente ausgenommen. Tabelle 1 vermittelt die Zahlen für die ein-

rten, Angaben über sichere Brutnachweise sowie Schätzungen für die ausserhalb der tände brütenden und die nichtbrütenden Tiere. Diese Schätzungen sind bei einigen Arallem Stockente und Höckerschwan) sicher grob und liegen wahrscheinlich zu tief.

Die Schilfvögel des Zürich- und Obersees (1976). Kolonne 1 enthält die Anzahl Paare iher untersuchten Schilfbeständen, Kolonne 2 die Anzahl der Nestfunde oder Beobachon Familien mit frisch geschlüpften Jungen (beim Haubentaucher nur Nester mit Eiern ch geschlüpften Jungen, bei der Rohrammer auch futtertragende und verleitende Alt-olonne 3 den Prozentsatz von 2 an 1, Kolonne 4 die geschätzte Anzahl Paare, die ausser-Schilfbestände brüteten, Kolonne 5 die Summe von 1 (bzw. 2: Stockente) und 4, und Kolie geschätzte Anzahl nichtbrütender Individuen.
iche Aufenthalter aus den zwei Brutkolonien Chrattenholz/Lidwil und Grynau an veren Orten; °: die Stockente wurde für die engere Analyse nicht berücksichtigt.

	1	2	3	4	5	6
aucher	507	276	54%	10	517	430
ıcher	10	6	60%	0	10	?
ıer	1	1		*	1	*
ımmel	1	1		0	1	0
chwan	24	24	100	35	59	70
e°	?	105	?	100	200	1400
ılle	9	3	33%	0	9	?
ın	31	23	74%	0	31	5
ın	504	484	96%	30	534	400
wirl	3	0		0	3	?
hrsänger	99	1	1%	92	191	?
ırsänger	408	170	42%	15	423	?
ohrsänger	50	38	76%	0	50	?
ner	154	34	22%	43	197	?
	1816	1166	64%			

ungen der Standortparameter untereinander

iehungsgefüge, das nur die unabhängigen Variablen untereinander verbindet, vermittelt 'ormativen Einblick in die ökologischen Wirkungssysteme innerhalb und ausserhalb der tände. Eine aus graphischen Gründen stark vereinfachte Darstellung gibt Bild 2 wieder. h gesehen ist die Schilffläche der zentrale Parameter. Mit ihr stehen am meisten andere ı in unmittelbarer Verbindung. Der kausale Angelpunkt des ganzen Netzes muss jedoch chten oberen Ecke des Schemas gesucht werden. Hier finden sich einige sehr grundlegen-lationen, etwa jene zwischen der Schilffläche im 1-km-Radius und der topographisch bevollen Flachwasserbreite, und jene zwischen der Schilffläche im 1-km-Radius und der onsdichte. Diese Beziehungen weisen deutlich darauf hin, dass bei geeigneter lokaler Toie gleich mehrere und grössere Schilfbestände gehäuft auftreten, und für die von Schilfbeständen positive oder negative Faktoren jeweils nicht inan-eten. Vielmehr sind günstige Gegebenheiten und abträglic von s Menschen, «geklumpt» verteilt. Als Mittlerin zwischen n-gen und der Schilffläche – und damit vielen weiteren s r ınz zum nächsten grossen Schilfbestand.

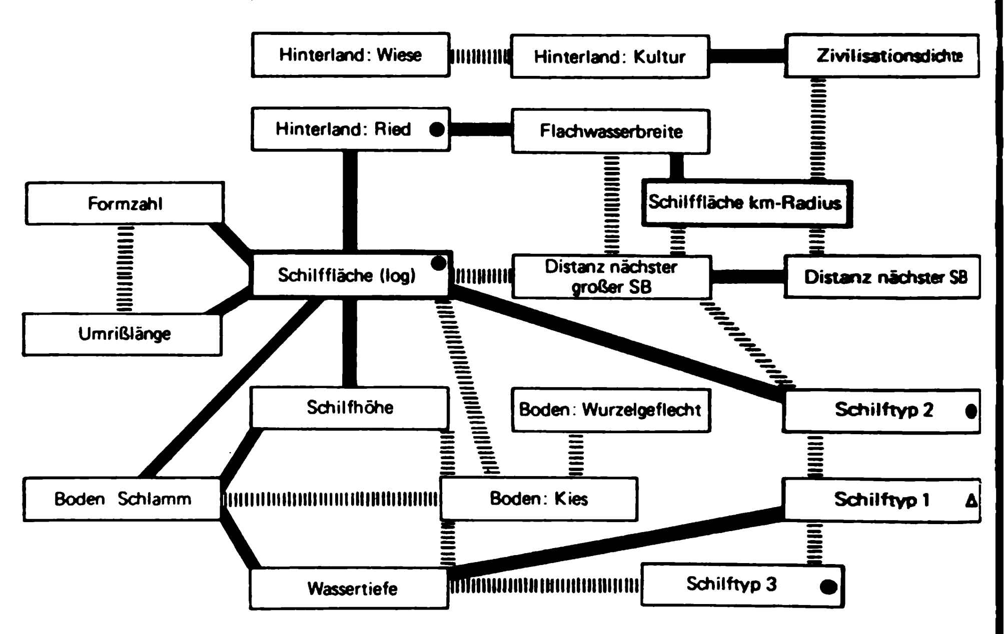


Bild 2 Beziehungsgefüge der unabhängigen Variablen untereinander. Die Darstellung ist aus graphischen Gründen vereinfacht und auf Korrelationen beschränkt, deren Koeffizient r mehr als $\mp$ 0,3 beträgt. Dies entspricht einem F-Wert von etwa 20,0. Solide Balken bezeichnen positive, gestrichelte negative Korrelationen. Schwarze Punkte bedeuten eine positive Korrelation mit der Habitatdiversität, das leere Dreieck eine negative.

Der Einfluss einer flachen topographischen Situation erstreckt sich auch auf das Hinterland der Schilfbestände, wo sie die Zivilisation fernhält und die Anwesenheit von Riedland begünstigt. Der gleichzeitigen Wirkung der Topographie auf Schilffläche (r = 0,2558) und «Hinterland:Ried» verdanken diese beiden Parameter wohl einen Teil ihrer positiven Beziehung. Es sind aber auch direkte Mechanismen denkbar, etwa die gegenseitige Abschirmung gegenüber Einflüssen vom Land beziehungsweise vom Wasser her. Eine weitere bemerkenswerte Korrelation ist jene zwischen Schilffläche und Formzahl. Sie besagt, dass grosse Schilfbestände langgestreckt sind, was nicht unbedingt zu erwarten war. Dieser Befund hebt deutlich die lineare Natur der Schilfröhrichte hervor.

Ein anderer Komplex von Parametern ist jener, der die Bodenbeschaffenheit und die allgemeine Produktivität des Standortes betrifft. Kiesige Partien tragen kleinere Schilfbestände mit niedrigeren Halmen, die weniger weit vom Ufer weg ins Wasser vordringen. Gegenspieler von Kies ist Schlamm, der mit Schilffläche, Schilfhöhe und Wassertiefe positiv korreliert ist. Allerdings ist hier schwer entscheidbar, welcher Faktor die Ursache des andern ist. Ein eutropher, schlammiger Standort fördert nicht nur das Schilfwachstum, sondern umgekehrt unterstützt die Strömungsarmut im Innern eines grossen Schilfbestandes auch die Anhäufung von organischem Material. Demgegenüber kann jedoch ein Schilfbestand in einer übermässig eutrophierten Bucht unter den vielfältigen Erscheinungen des «Schilfsterbens», wie Faulschlammbildung und Sauerstoffmangel, Sklerenchymschwäche, Algenkragen usw. leiden. Dies ist z.B. im östlichen Teil von SB 190 (Rapperswil) der Fall, wo Schilftyp 1 bereits vor mindestens 20 Jahren verschwunden ist.

Die Habitatdiversität innerhalb der Schilfbestände ist hoch mit der Schilffläche korreliert (r = 0,6837). Dies beruht wohl hauptsächlich auf dem Verhalten des verhältnismässig seltenen Schilftyps 2, der seinerseits stark von der Schilffläche abhängt (Bild 2). Dagegen herrscht Schilftyp 1 in

kleinen Schilfbeständen häufig allein, so dass sich mit der Habitatdiversität eine negative Korrelation einstellt.

5 Beobachtungen zu Einzelarten

Zwergtaucher und Zwergdommel

Die Verbreitung des Zwergtauchers lässt eine Häufung von Brutpaaren in Deltas erkennen, die sich in den erfassten Standortparametern nur unvollständig ausdrückt. Nach K.M. Bauer und U.N. Glutz (1966) bevorzugt der Zwergtaucher «kleinere verlandende Teiche und Weiher und entsprechende Uferzonen grösserer Gewässer». Diesen Ansprüchen kommen die typischerweise kleinräumig und reich strukturierten Deltas offenbar besonders entgegen. Bezeichnenderweise lagen die nachgewiesenen Nistterritorien, mit einzelnen Ausnahmen, in beinahe abgeschnittenen Buchten oder hinter vorgelagerten Nehrungen. Zudem scheint ein starker Zusammenhang mit dem Futterangebot zu bestehen. Der Zwergtaucher frisst «grösstenteils Insekten und deren Larven (besonders zur Brutzeit)» (K.M. Bauer und U.N. Glutz, 1966). Die erwähnten Deltabereiche erwiesen sich in einer Nebenuntersuchung (vgl. H. Schiess, 1979) als die mit Abstand an Libellenarten reichsten Uferabschnitte des Sees: An der Linthkanal-Mündung (SB 139–149) wurden 16 Arten festgestellt, im Lachener Horn (SB 114 und 115) 13 Arten, in den übrigen Schilfbeständen hingegen stets weniger als 10 und meist sogar nur 1 bis 2.

Solche strukturreichen Schilfbestände scheint auch die Zwergdommel vorzuziehen. Das einzige festgestellte Paar im Lachener Horn stützt diese Annahme, die im übrigen aus den Literaturangaben abgeleitet werden kann. Wahrscheinlich spielen jedoch für diese Art neben dem Nahrungsangebot vor allem in das Röhricht eingesprengte oder daran angrenzende Weidenbüsche eine wichtige Rolle.

Sumpfrohrsänger und Rohrammer

Die Territorien von Sumpfrohrsänger und Rohrammer sind in den Schilfbeständen nicht homogen über die ganze Fläche verteilt, auch wenn bedeutende Anteile der nicht überschwemmten Schilftypen vorhanden sind. Vielmehr drängen die Reviere sich im trockensten Teil des Röhrichts zusammen und reihen sich entlang der landwärtigen Schilfgrenze in mehr oder weniger regelmässigen Abständen auf. Beide Arten zählen nicht zu den eigentlichen Schilfröhrichtspezialisten, sind aber im Untersuchungsgebiet – und besonders im Bereich der ausgedehnten, gut gepflegten, hochstauden- und gebüscharmen Riedwiesen – weitgehend auf die engste Nachbarschaft der Schilfbestände als Brutplatz angewiesen. Der Übergang zwischen Schilf und Ried bietet optimal erhöhte Singwarten und erfüllt damit eine wichtige Bedingung, welche die Rohrammer an ihr Territorium stellt. Der Sumpfrohrsänger besiedelt innerhalb der Schilfbestände vor allem Stellen mit Büschen, Brennesselfluren oder Rohrglanzgras-Bestände.

Teich- und Drosselrohrsänger

Aus der Revierkartierung ergaben sich deutliche Hinweise auf eine territoriale Konkurrenz zwischen Teich- und Drosselrohrsänger. Zwar besteht eine im allgemeinen deutliche ökologische Sonderung der beiden Arten, indem der Drosselrohrsänger ausschliesslich in der äussersten Zone über tiefem Wasser baut, der Teichrohrsänger jedoch die Übergangszone zwischen Schilftyp 1 und Schilftyp 3 bevorzugt. Im SB 118, einem der charakteristischen Drosselrohrsänger-Habitate, bleibt die Paarzahl des Teichrohrsängers hinter dem Erwartungswert aus den Regressionen zurück: erwartet werden 13, festgestellt wurden lediglich 7 Paare. Nach Pater J. Heim (mündliche Mitteilung) ist das Verhältnis der beiden Arten dort regelmässig etwa 1 : 2 zu Gunsten des Drosselrohrsängers, von dem 12 Paare registriert wurden. Das Verteilungsmuster der Territorien im SB 62 (Steinfabrik Pfäffikon) legt folgende Deutung nahe: Wo der Schilfstreifen eine bestimmte Breite (ungefähr 15 m) unterschreitet, verdrängt der Drosselrohrsänger den Teichrohrsänger auch

aus den landwärtigen Bestandesteilen. Dieses Beispiel darf als Hinweis dafür gewertet werden, dass interspezifischer Wettbewerb im Gesamtbild der auf eine Art wirkenden ökologischen Faktoren unter Umständen von spürbarem Einfluss sein kann (vgl. J. M. Diamond, 1975). In diesem Zusammenhang ist auch die Beobachtung bemerkenswert, dass sich Blässhuhn und Haubentaucher in den minimalen und an Nistmaterial auffallend armen Schilfbeständen des untersten Seeteils gegenseitig regelmässig Baustoffe von angefangenen Nestern stehlen.

6 Zusammenfassung

Im Sommer 1976 wurden mit Hilfe von Revierkartierungen und Nestersuche die in den 212 vorher inventarisierten Schilfbeständen von Zürich- und Obersee brütenden Vögel erfasst. Im ganzen wurden 1816 Paare von 13 Arten ausgewertet. Es sind dies, in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit: Haubentaucher, Blässhuhn, Teichrohrsänger, Rohrammer, Sumpfrohrsänger, Drosselrohrsänger, Teichhuhn, Höckerschwan, Zwergtaucher, Wasserralle, Rohrschwirl, Graureiher und Zwergdommel.

Die im Vergleich mit der sie umgebenden Landschaft homogenen und scharf abgegrenzten Schilfröhrichte wurden als Biotopinseln aufgefasst. Die Anzahl Arten, Diversität, Paarwertsumme (ein einfacher Index, der die regional seltenen Vogelarten stark bewertet) und die Anzahl Paare der Vögel in den Schilfinseln wurden mit schrittweisen multiplen Regressionen auf die Einflüsse von 24 Standortparametern, darunter Schilffläche und Isolationsgrad des Schilfbestandes, geprüft.

Die Schilffläche erwies sich als die stärkste, einzelne unabhängige Variable. Die meisten Paarzahlen, die Gesamtpaarzahl und die Paarwertsumme sind mit ihrem Absolutwert eng korreliert, die Artenzahl weist die stärkste Korrelation mit der Wurzelfunktion der Fläche auf und die Diversität mit ihrem Logarithmus. Die Steigung der doppeltlogarithmischen Artenzahl/Areal-Korrelation beträgt 0,380, abzüglich der Einflüsse anderer unabhängiger Faktoren 0,274.

Dagegen spielt die Isolation eine untergeordnete Rolle; ausser der Schilffläche zeigen noch fünf weitere Standortfaktoren mehr signifikante Korrelationen zu den abhängigen Variablen als eines der drei Isolationsmasse. Artenzahl und Diversität stehen in negativer Beziehung mit der «Distanz zum nächsten grossen Schilfbestand». Die Vogelpopulationen der Schilfinseln können aufgrund der räumlichen Dimensionen und ihrer eigenen Mobilität nicht im gleichen Mass voneinander getrennt sein, wie die Faunen der tropischen Archipele, deren Studium die Entwicklung der Inseltheorie förderte. Sechs verschiedene Hypothesen werden genannt, die eine Erklärung zu den beobachteten Isolationseffekten liefern könnten. Ihre analytische Prüfung wird durch die komplexen Interkorrelationen erschwert, die insbesondere Schilffläche und Isolation mit den übrigen ökologischen Faktoren verbinden.

Acht der erfassten ökologischen Parameter (ausser Fläche und Isolation) leisten signifikante Beiträge zur Erklärung der abhängigen Variablen; die wichtigsten sind die röhrichtinterne Habitatdiversität, die Anwesenheit von Riedwiesen im Hinterland der Schilfbestände, die Bodenbedeckung durch Schilftorf, die Länglichkeit der Bestände und die Breite der Flachwasserzone (alle positiv korreliert).

Aufgrund der genauen Flächenangaben für die Schilfbestände kann für jede der häufigeren Vogelarten das Minimumareal (Tab. 2) angegeben werden. Ebenso lässt sich der Anteil der von einer Art besiedelten Schilfbestände in Abhängigkeit von deren Fläche ermitteln (sogenannte Inzidenzkurven, J. M. Diamond, 1975), und es lässt sich eine Fläche (F_{50}) abschätzen, bei der 50 Prozent der Schilfbestände von der fraglichen Vogelart besiedelt sind.

Drei Gruppen von wertvollen Schilfbeständen können unterschieden werden. Sie zeigen jeweils charakteristische Züge und beherbergen bis zu einem gewissen Grade auch eigene typische Vogelfaunen. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse lassen sich Empfehlungen für den Naturschutz am Zürich- und Obersee formulieren.

Tabelle 2 Minimumareal und Halbwertfläche (F_{50}) in m^2 für die Vögel in den Schilfbeständen des Zürichsees. Klammern bedeuten, dass entweder die Angabe ungenau ist (Blässhuhn) oder dass die Art zu selten ist für eine gesicherte Aussage.

	Minimum-areal	Halbwerts-fläche F_{50}
Wasservögel		
Blässhuhn	(10)	(20)
Haubentaucher	40	500
Teichhuhn	650	3 000
Höckerschwan	71	20 000
Zwergtaucher	2 690	(10 000)
Wasserralle	3 500	(10 000)
Singvögel		
Teichrohrsänger	70	350
Rohrammer	50	1 300
Sumpfrohrsänger	200	2 000
Drosselrohrsänger	170	4 500

7 Literatur

Bauer, K.M., Glutz von Blotzheim, U.N., 1966: Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Bd. 1, Akademische Verlagsgemeinschaft, Wiesbaden.

Diamond, J.M., 1975a: Assembly of species communities. In: Cody, M.L., Diamond, J.M., (eds): Ecology and evolution of communities, S. 342–444, Harvard Univ. Press, Cambridge.

Lang, G., 1969: Die Ufervegetation des Bodensees im farbigen Luftbild. Landesk. Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum *8* : 1–74.

MacArthur, R.H., Wilson, E.O., 1963: An equilibrium theory of insular zoogeography. Evolution *17* : 388–403.

MacArthur, R.H., Wilson, E.O., 1967: The theory of island biogeography. 203 S., Princeton Univ. Press, Princeton N.J.

Schiess, H., 1979: Gedanken zum Naturschutz an Zürich- und Obersee. In: 52. Jber., 1978, Verband zum Schutze des Landschaftsbildes am Zürichsee, S. 11–37.

Heinrich Schiess, Zoologisches Institut der Universität Zürich, Abteilung Ethologie und Wildforschung, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich

Vorstand der Naturforschenden Gesellschaft Zürich 1990/91

Präsident: Prof. Dr. Stephan Müller
Inst. für Geophysik ETH
ETH Hönggerberg
8093 Zürich, Tel. 377 26 10

Vizepräsident: Prof. Dr. Klaus Itten
Geogr. Inst. Universität
Winterthurerstr. 190
8057 Zürich, Tel. 257 51 60

Sekretär: Dr. Heinrich Bührer
EAWAG/ETH
Überlandstr. 133
8600 Dübendorf
Tel. 823 51 85

Quästor: Ferdinand Stutz
Finanz- und Treuhand AG
Chrottenbuckstrasse 10
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 23 58

Redaktor: Prof. em. Dr. H.H. Bosshard
Im Stucki 5
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 19 61

Archivar: Dr. Markus Schnitter
Zumikerstr. 20
8700 Küsnacht, Tel. 910 56 91

Beisitzer: Prof. Horst Dargel
Im Ahorn 15
8125 Zollikerberg
Tel. 391 68 89

Prof. Dr. Erich Dubler
Anorganisch-chemisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 46 21

Prof. Dr. Rolf Nöthiger
Zoologisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 48 61

PD Dr. Irene Tobler-Kost
Pharmakol. Inst. Universität
Gloriastr. 32
8006 Zürich, Tel. 257 26 82

PD Dr. med. Eugen Schönle
Universitäts-Kinderklinik
Steinwiesstrasse 75
8032 Zürich, Tel. 259 71 11

PD Dr. Hannes Schüepp
Eidg. Forschungsanstalt
für Obst-, Wein- und
Gartenbau
8820 Wädenswil, Tel. 783 63 15

Dr. Rosmarie Waldner
Stuhlenstr. 23
8123 Ebmatingen
Tel. 980 11 38

Vertreter in der Kommission der Zentralbibliothek:
Prof. H. Dargel

Naturschutzaufgaben:
Prof. Dr. Andreas Gigon

Vertreter im Senat der SNG:
Dr. Heinrich Bührer

Rechnungsrevisoren:
Werner Kübler
Sägegasse 8
8702 Zollikon, Tel. 391 55 83

Mario Stolz
Bundtacherstrasse 5
8127 Forch, Tel. 980 07 80

Stellvertreter:
Dr. Andreas Fischer
Grundwiesstrasse 10
8700 Küsnacht, Tel. 910 69 26

Nekrolog

Heinrich Kutter (1896–1990)

Am 23. Juli 1990 verstarb Heinrich Kutter, einer der grossen Ameisenforscher der Schweiz, im 94. Lebensjahr. Zwischen seiner ersten (1913) und seiner letzten Publikation (1986) liegen 73 Jahre eines äusserst reichen Forscherlebens. Neben Forel, Emery und Santschi, die er alle persönlich gekannt hatte, zählt Kutter wohl zu den bedeutendsten Ameisen-Taxonomen Europas. Seinen Ruf errang er nicht etwa als Leiter einer Hochschulforschergruppe, sondern als praktisch tätiger Apotheker, der mit Feuereifer die Erforschung der Ameisen förderte.

Heinrich Kutter wurde am 22.9.1896 im Pfarrhaus in Vinelz am Bielersee geboren. Sein Vater, Hermann Kutter, wurde zwei Jahre später Pfarrer am Neumünster in Zürich. Als Mitbegründer der weltweit bekannten religiös-sozialen Bewegung der protestantischen Kirche pflegte dieser einen grossen Freundeskreis, zu dem auch die Familie des Zürcher Kunsthistorikers Prof. Carl Brun gehörte. So begegneten sich die naturbegeisterten Söhne beider Familien, Heinrich Kutter und Rudolf Brun. Am 6. Februar 1910 hatte der 25 Jahre alte Rudolf Brun, Neurologe, Psychoanalytiker und Ameisenforscher (ein Schüler des Hirnforschers Constantin von Monakow), den 13½jährigen Heinrich Kutter eingeladen, seine Insektensammlung anzuschauen. Durch dieses Schlüsselerlebnis wurde der Jüngling zu den Ameisen gelenkt. 1912, noch nicht 16jährig, schrieb er auf Drängen seines Freundes Brun hin, seine erste wissenschaftliche Arbeit über die Koloniegründung der Roten Waldameise, die 1913 erschien und ihm den Weg zu August Forel öffnete. Noch 1990, in Hölldobler und Wilsons epochalem Werk «The Ants», ist diese Arbeit des Gymnasiasten Kutter zitiert. Im Sommer 1914, wenige Tage vor Ausbruch des Ersten Weltkrieges, suchte der junge Heinrich Kutter als Helfer und Begleiter des von einem Hirnschlag behinderten Forel Norditalien auf, um Ameisen zu sammeln. Die Lupe, die Heinrich Kutter dem rechtsseitig gelähmten Meister, der als Sonnenschutz einen Tropenhelm trug, beim Untersuchen der Ameisen vor die Augen halten musste, hatte Heinrich Kutter bis ins hohe Alter stets in seiner Tasche bei sich. Er wurde einer der bedeutendsten Forel-Schüler. 1919 schrieb August Forel in einem Brief an den 25jährigen Heinrich Kutter, dass er ihn als seine Vertrauensperson betrachte, die seinen Ameisen-Nachlass in der Schweiz betreuen sollte.

Heinrich Kutter studierte Pharmazie an der ETH in Zürich, wo er seine spätere Ehegattin Luise Trüb kennenlernte. Er doktorierte 1934 bei Prof. O. Schneider-Orelli über Erbsen-Schädlinge im Rheintal. Den Lebensunterhalt für die sechsköpfige Familie verdienten Heinrich und Luise Kutter-Trüb als Apotheker-Ehepaar während über 30 Jahren in Flawil. 1959, nach dem Ruhestand, lebten sie 12 Jahre in Männedorf, später in Egg. Hier wie dort waren Ameisen Heinrich Kutters intensive Freizeitbeschäftigung. Während seinen Untersuchungen sass oft ein grüner Papagei auf seiner Schulter. 1979 verstarb seine Frau Luise nach langen Jahren der Krankheit

und rührender Pflege durch ihn. Heinrich Kutter publizierte über 100 Arbeiten. Zwei Ehrendoktorate von den Universitäten Lausanne, 1962, und Bern, 1963, überraschten den bescheidenen Forscher, der 1972 auch Ehrenmitglied der NGZ wurde.

1950 entdeckte Heinrich Kutter in Saas Fee bei der 2,5 mm grossen Ameise *Teleutomyrmex schneideri*, die auf Kosten einer andern Art lebt, den extremsten Fall von sozialem Parasitismus bei Ameisen. Die Weibchen dieser seltenen Art leben auf dem Rücken einer Königin der Rasenameise *Tetramorium caespitum*, wo sie auch ihre Eier ablegen. Die Eier beider Königinnen werden von den Arbeiterinnen der Rasenameise übernommen und weiter gehegt. Ein internationales Forscherteam hat zusammen mit Heinrich Kutter dieses extreme Beispiel einer Lebensgemeinschaft weiter untersucht. Die Schweiz wird seither von E. O. Wilson, dem amerikanischen Myrmekologen und Soziobiologen, als europäische Hochburg der Ameisenforschung, besonders des Sozial-Parasitismus, bezeichnet.

Über die sozialparasitischen Ameisen der Schweiz verfasste Heinrich Kutter 1969 denn auch ein spannend geschriebenes Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. Dass der Harvard-Professor Wilson den 90jährigen Heinrich Kutter 1986 in Egg besucht hatte, erfüllte ihn mit besonderer Freude.

Von den bekanntesten früheren Arbeiten seien zwei erwähnt: «Gehe hin zur Ameise!», schrieb er 1920, und zu August Forels 100. Geburtstag erschien «Die Welt der Ameisen», eine meisterhafte deutsche Übersetzung ausgewählter Kapitel des fünfbändigen Forel-Werkes.

1977, in Heinrich Kutters 81. Altersjahr, erschien nach jahrzehntelanger minutiöser Arbeit seine umfassende Monographie der Ameisen der Schweiz mit einem wegleitenden neuen Bestimmungsschlüssel in der Reihe «Insecta Helvetica, Vol. 6 Hymenoptera: Formicidae». Die über 600 hervorragenden eigenhändigen Zeichnungen lassen erahnen, mit welcher Hingabe er die Ameisen, seine kleinen Freunde, beobachtet hatte. Einige seiner Skizzen dienten als Vorlagen für die Gestaltung der 1000-Franken-Note der Schweizerischen Nationalbank. Im Selbstverlag veröffentlichte er 1978 noch weitere 500 Abbildungen. Das abnehmende Augenlicht und die zitternden Hände hinderten den greisen Heinrich Kutter immer mehr seine kleinen Ameisen zu untersuchen. Ein lange Jahre gehegter und aufgeschobener Wunsch blieb unerfüllt, zahlreiche Ameisen einer Expeditionsreise im Winter 1936/37 nach Kamerun blieben deshalb unbearbeitet. Viele Besucher aus aller Welt fanden in Heinrich Kutter bis ins höchste Alter stets einen bescheidenen und begeisternden wissenschaftlichen Gesprächspartner, einen leidenschaftlichen klassischen Musikliebhaber, der auch über Gott und die Welt, so wie er es in vielen lebhaften Diskussionen in seinem väterlichen Pfarrhaus gewohnt war, zu plaudern Zeit fand. Dass geistige Auseinandersetzungen auch unerwartet schmerzvoll enden können, erlebte er als ETH-Student beim Generalstreik 1918 auf dem Münsterhof, als er von einer verirrten Kugel am Fuss verletzt wurde. 1986, 90 Jahre alt, veröffentlichte er seine letzte Publikation: «Über Anomalien einheimischer Formiciden». Die beiden letzten Lebensjahre verbrachte Heinrich Kutter im Alters- und Pflegeheim Neuwies in Uster.

Sein wissenschaftlicher Nachlass und seine hervorragende eigene Sammlung von 4500 Ameisenarten sind von europäischem Spitzenwert und werden heute in Lausanne im Musée Zoologique, Palais de Rumine, beherbergt, wo sie neben August Forels Sammlung einheimischer Ameisen für künftige Forschertätigkeit benutzt werden können. Mit Heinrich Kutter ist eine grosse Persönlichkeit dahingegangen, die zeitlebens Entbehrungen und Opfer für die wissenschaftliche Wahrheit auf der Suche nach einem der vielen Geheimnisse der Schöpfung, selbst im Kleinsten, auf sich genommen hat. Seine Begeisterung und seine Liebe für die sozialen Ameisen möge andere beflügeln!

Rolf Meier

135. Jahrgang 1990

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Inhaltsverzeichnis

Beiträge

Streiflicher aus Wissenschaft und Forschung

Berichte und Notizen

Aus alten Jahrgängen

Nekrologe

Buchbesprechungen

Neujahrsblatt auf das Jahr 1991 (193. Stück)

Furrer, G.: 25 000 Jahre Gletschergeschichte, dargestellt an einigen Beispielen aus den Schweizer Alpen. 52 Seiten, Preis Fr. 15.–

Hinweise für Autoren

1 **Manuskript**

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

3 Einzelheiten zum Text

31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle ...).

4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild ...) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 135, Heft 4, Dezember 1990

Inhalt

Preis Fr. 18.–

Heft 1
Jahrgang 136
März 1991

VIERTELJAHRSSCHRIFT R NATURFORSCHENDEN SELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85*, zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 83.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. em. Dr. H.H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich)*. – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

ISSN 0042-5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/1: 1–12

Die räumliche Verteilung der Galaxien[1]

Gerhard Börner, MPI für Astrophysik, Garching

In den letzten Jahren haben Messungen der Rotverschiebung von Galaxien eine Fülle von räumlichen Strukturen in der Verteilung der leuchtenden Materie aufgedeckt. Die Schwierigkeiten, diese Verteilungen im Rahmen eines kosmologischen Modells zu verstehen, beruhen vor allem auf dem Gegensatz zwischen dieser inhomogenen Verteilung und dem äusserst gleichmässigen kosmischen Mikrowellenhintergrund. Ein spezieller Ansatz, das sog. Pfannkuchenmodell, wird kurz geschildert.

The spatial distribution of galaxies

During the last few years redshift measurements of galaxies have revealed a variety of spatial structures in the distribution of the luminous matter. The difficulties to understand these distributions in the framework of a cosmological model stem from the contrast between this inhomogeneous distribution and the remarkably uniform cosmic microwave background. A special model, the so-called pancake model is briefly described.

1 Einführung

Das heutige Bild des Universums beruht auf einigen grundlegenden Beobachtungen und der Einsicht, dass sehr einfache Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen genügen, um die Konsequenzen dieser Beobachtungen darzustellen. Es ist ganz interessant anzumerken, dass die sog. «Friedmann-Lemaître»-Lösungen, d.h. die homogenen, isotropen mathematischen Modelle der Raumzeit, die von einer Singularität ausgehend expandieren, den fundamentalen Beobachtungen historisch vorausgingen. Selbst Einstein hatte zunächst noch diese Lösungen mit Skepsis betrachtet, da sie seiner anfänglichen Überzeugung eines statischen Universums mit einer unbegrenzten, gleichmässigen Verteilung der Sterne widersprachen.

Es waren schliesslich die Arbeiten von Hubble, die in den zwanziger Jahren zunächst zeigten, dass es viele Sternsysteme ausserhalb unserer Milchstrasse gibt. Im Lichte jener fernen Galaxien fand Hubble (in Fortführung der Arbeiten von Slipher und Humason) Spektrallinien, die den ins Rote verschobenen atomaren Spektrallinien entsprachen. (Bei diesen spektroskopischen Untersuchungen wird das Licht mit Hilfe eines Prismas oder eines Beugungsgitters in seine Grundfarben zerlegt. Während ein glühender Draht, wie der einer Glühbirne, Licht im gesamten sichtbaren Spektralbereich aussendet, erscheint ein leuchtendes Gas völlig anders. Reiner Wasserstoff, reines Natrium oder reiner Sauerstoff zeigen einige helle, klare Farben, die von dunklen Bereichen unterbrochen sind. Dieses Muster der hellen Spektrallinien eines bestimmten Elementes ist der Fingerabdruck, nach dem es identifiziert werden kann. Im Licht

[1] Nach einem Vortrag vor der Naturforschenden Gesellschaft Zürich vom 5. Februar 1990.

der Sterne erscheinen Spektrallinien oft dunkel, «in Absorption», da relativ kühles Gas in der Hülle aus dem Licht, das von innen kommt, den Teil aufnimmt, «absorbiert», der den charakteristischen Spektrallinien entspricht. Man weiss z. B., dass Wasserstoff auf der Sonne vorkommt, denn im Spektrum der Sonne erscheinen die aus dem Labor bekannten Spektrallinien des Wasserstoffes. Das Element Helium wurde tatsächlich zuerst durch seine Linien im Sonnenspektrum entdeckt, bevor es auf der Erde isoliert wurde.)

Hubble interpretierte diese Verschiebung zu grösseren Wellenlängen als das Resultat einer homogenen Expansion, bei der die fernen Galaxien sich von uns wegbewegen mit einer Geschwindigkeit, die ihrer Entfernung d proportional ist:

$$cz = v = H_0 d \tag{1}$$

In diesem sog. Hubble-Gesetz ist die Dopplergeschwindigkeit v der Fluchtbewegung gleich cz, dem Produkt aus Lichtgeschwindigkeit und Rotverschiebung. Für die Hubble-Konstante H_0 werden Werte zwischen 50 und 100 km s^{-1} Mpc^{-1} angegeben, was einem «Expansionsalter» H_0^{-1} von 10 bis 20 Milliarden Jahren entspricht[2]. Bewegen wir uns in Gedanken um diese Zeitspanne zurück in die Vergangenheit, so waren alle die auseinanderstrebenden Galaxien, die wir jetzt beobachten, in einem Punkt versammelt. In Bild 1 ist eine Beobachtungsserie zum Hubbleschen Gesetz wiedergegeben.

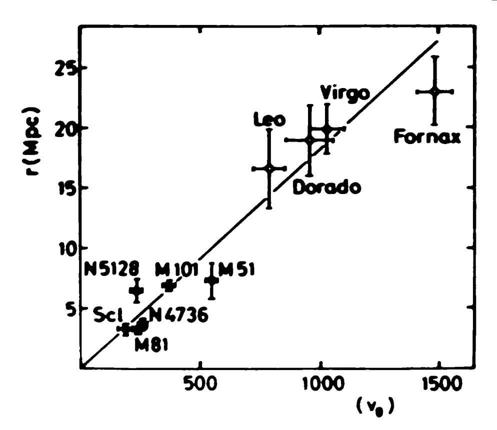


Bild 1 Das Hubble-Gesetz für verschiedene nahegelegene Galaxien. Die gerade Linie entspricht der Hubble-Beziehung von Gleichung 1. v_0 ist die Dopplergeschwindigkeit in km s^{-1}. Die Messpunkte der Galaxien folgen dieser Relation mit relativ starker Streuung, was auf lokale Abweichungen von der kosmischen Expansion schliessen lässt.

Fig. 1 The Hubble law for various near galaxies. The straight line corresponds to the Hubble relation of equation 1. v_0 is the Doppler velocity in units of km s^{-1}. The measurements of the galaxies show the general trend with a large scatter. This indicates local deviations from the cosmic expansion.

Die Hubble-Konstante besitzt eine einfache Interpretation in den sogenannten «Friedmann-Lemaître»-Modellen: In ihnen wird die Expansion als das Auseinanderfliessen einer idealisierten, gleichmässig verteilten Materie aufgefasst, die durch homogene Dichte $\rho(t)$ und Druck $p(t)$ beschrieben wird. Die Flüssigkeitsteilchen, die man sich als repräsentativ für die Galaxien denken

Astronomische Entfernungen werden in Lichtjahren gemessen, d. h. in Einheiten der Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Die Einheit parsec (pc) ist daraus abgeleitet 1 pc = 3.25 Lichtjahre ≈ 10[illegible] cm. 1 Megaparsec (Mpc) = 1 Million parsec.

kann, schwimmen mit der kosmischen Expansion gleichmässig mit, nur ihr Abstand verändert sich proportional zu einem Expansionsfaktor R(t). Die relative Rate dieser Veränderung zum gegenwärtigen Zeitpunkt t_0 ist die Hubble-Konstante H_0.

Die Friedmann-Gleichungen beschreiben die Entwicklung des Expansionsfaktors R(t) als Funktion von Dichte, Druck und einer konstanten Krümmung K des Raumes. Sie enthalten auch die interessante Information, dass der Anfangszustand unseres Kosmos eine Singularität ist, bei der R(t), d.h. jeder endliche Abstand zweier Teilchen, gegen Null geht. Druck und Dichte werden unendlich gross in dieser Anfangssingularität, die sich in einer endlichen Zeitspanne t_0 in unserer Vergangenheit befindet. Das Alter der Sterne in den Kugelsternhaufen und das Alter der chemischen Elemente erlauben eine Abschätzung von t_0 zu 10 bis 20 Milliarden Jahren. Die bemerkenswerte Übereinstimmung mit dem für H_0^{-1} erhaltenen Wertebereich deutet an, dass das beobachtbare Universum tatsächlich vor etwa dieser Zeit entstanden ist.

Die mittlere Dichte der kosmischen Materie ρ_0 lässt sich mit Hilfe von H_0 als dimensionslose Grösse Ω_0 angeben

$$\Omega_0 \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2}\,\rho_0$$

(G: Gravitationskonstante)

Die leuchtende Materie in den Galaxien ergibt eine untere Grenze für Ω_0 von etwa 0,01; dynamische Effekte in Gruppen und Haufen von Galaxien führen zu $\Omega_0 = 0{,}1$ bis 0,2 – auch $\Omega_0 = 1$ ist nicht ausgeschlossen – eine Tatsache, die auf die Existenz nichtleuchtender, «dunkler» Materie schliessen lässt (vgl. z.B. Börner 1988).

2 Die Hintergrundstrahlung

Ein weiterer grosser experimenteller Fortschritt in der Kosmologie war 1965 die Entdeckung der sog. 3K-Hintergrundstrahlung durch Penzias und Wilson. Diese Strahlung im Wellenlängenbereich von 10 cm bis unter 1 mm trifft aus allen Richtungen in gleicher Stärke ein und folgt in ihrer spektralen Verteilung der Planckschen Strahlungsformel. Der im November 1989 gestartete NASA-Satellit COBE hat diese Strahlung vermessen und eine frappierende Übereinstimmung mit der theoretischen Kurve zur Temperatur von 2,735 K gefunden (Mather et al. 1990). In Bild 2 ist zu sehen, wie perfekt die einzelnen Messungen mit ihren Fehlerabschätzungen der Planck-Formel folgen. Das Universum scheint der ideale Schwarze Körper zu sein.

Diese Messung muss man als Bestätigung für einen heissen, dichten Anfangszustand des Universums ansehen. Es muss eine Zeit gegeben haben, in der

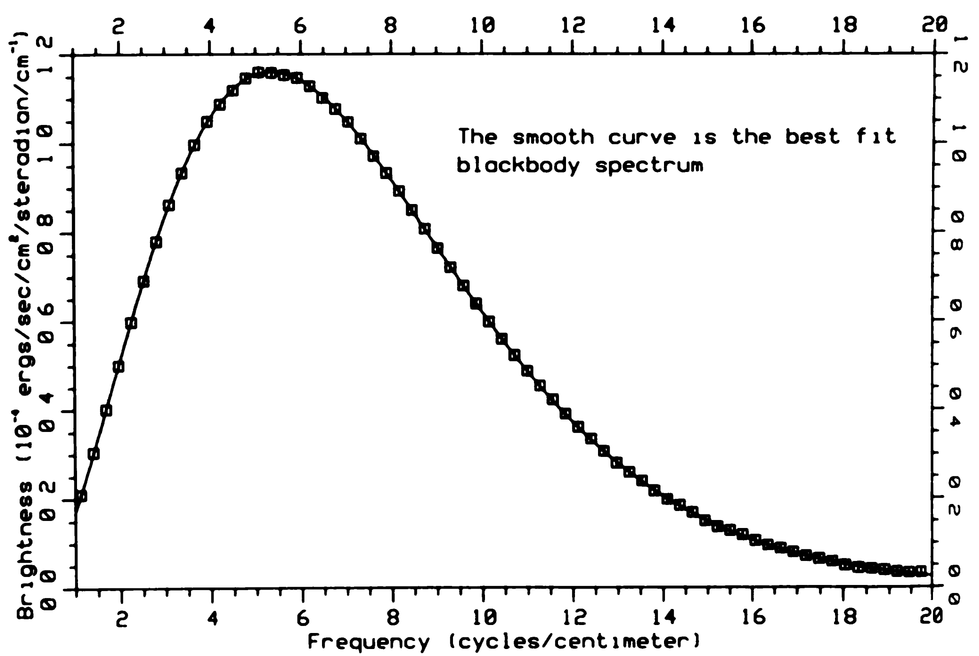


Bild 2 Die durchgezogene Kurve entspricht der Planckschen Formel eines thermischen Strahlers mit der Temperatur T = 2,735 K. Die kleinen Quadrate sind die einzelnen Messpunkte und ihr Fehlerbereich. Die grossartige Übereinstimmung zeigt, dass das Universum einen praktisch strukturlosen, heissen Frühzustand durchlaufen hat.

Fig. 2 The drawn out line corresponds to the Planck formula for thermal radiation with a temperature T = 2,735 K. The small squares are the error boxes around the individual measuring points. The agreement is phantastic, indicating a practically structureless, hot early phase for the universe.

das Universum so heiss und dicht war, dass die Atome in ihre Kerne und Elektronen aufgelöst waren, eine Zeit, in der die Streuung der Photonen an freien Elektronen ein thermisches Gleichgewicht zwischen Strahlung und Materie aufrechterhielt. Dies entsprach einer Temperatur von mehr als 3000 K. Im Laufe der Expansion kühlte das Universum unter diese Temperatur ab, Wasserstoffatome bildeten sich und banden Elektronen, die Strahlung entkoppelte von der Materie, und das Universum wurde transparent. Nach der Entkopplung verringerte sich die Temperatur der Strahlung weiter umgekehrt proportional zum Skalenfaktor R(t). Zur Zeit der Entkopplung war das Universum etwa 1500mal kleiner als heute; im Standardmodell entspricht diese Zeit einigen 100000 Jahren nach dem Urknall. Nach diesem Zeitpunkt konnte die Materie ihrer Neigung zu Zusammenballung und Klumpenbildung nachgeben – die Galaxien entstanden.

Es ist in diesem Bilde allerdings nicht unmittelbar einsichtig, wie das äusserst gleichmässige Strahlungsfeld mit der stark inhomogen strukturierten Materieverteilung zusammenpasst.

3 Grossräumige Strukturen

Zur Zeit Hubbles brauchte man einige Stunden, um die Rotverschiebung einer hellen Galaxie mit einem 2,5-m-Teleskop zu messen. Heute können mit moderner elektronischer Ausrüstung, speziell Detektoren auf Siliziumbasis («CCD»-Empfänger), dieselben Messungen an einem 1,5-m-Teleskop in einigen Minuten durchgeführt werden. Diese umwälzende Entwicklung der Empfänger ermöglicht es, eine grosse Zahl von Rotverschiebungen zu messen und damit einen Eindruck von der dreidimensionalen Struktur des Universums zu gewinnen. 1956 kannte man nur von etwa 600 Galaxien die Rotverschiebung. 1976 war die Zahl auf 2700 angewachsen, und jetzt (1990) gibt es bereits mehr als 30000.

Ein sehr umfassendes Programm in diesen Vermessungskampagnen wird von Margaret Geller und John Huchra (Geller & Huchra 1989) am «Center for Astrophysics» in Cambridge, Massachussets, durchgeführt. Sie messen die Rotverschiebungen der Galaxien, die im Zwicky-Katalog aufgeführt sind, bis zur Grenzhelligkeit von $m_B = 15,5$. Bis jetzt (September 1990) sind 8 streifenförmige Gebiete am Himmel von je 6° Breite in der Deklination unter 120° Ausdehnung in galaktischer Länge ausgemessen worden. Etwa 10^{-5} (ein Hunderttausendstel) des durch den «Hubble Radius» $2c/H_0$ gegebenen Volumens (das etwa dem uns prinzipiell zugänglichen Teil des Universums entspricht) sind damit kartographiert.

Obwohl dies insgesamt nur ein kleiner Ausschnitt ist, findet man bemerkenswerte grossräumige Strukturen und Muster in der Galaxienverteilung. Bild 3 zeigt das berühmte Beispiel des ersten Streifens (deLapparent, Geller, Huchra 1986). Der 6° breite Bereich der Deklination ist dabei in die Zeichenebene projiziert. Rektaszension und Rotverschiebung sind in diesem keilförmigen Bild aufgetragen, das also die räumliche Verteilung einer flachen Schicht von Galaxien widerspiegelt. Über das Hubble-Gesetz $cz = H_0d$ kann ja aus der Rotverschiebung ein Wert für die Entfernung abgeleitet werden. Diese Darstellung enthält 1057 Galaxien mit Rotverschiebungen $cz \leq 15000$ km s^{-1}. Das räumliche Bild wirkt ausserordentlich inhomogen: Fast alle Galaxien liegen in ausgedehnten dünnen Schichten, die wie eine Haut grosse, fast leere Gebiete umschliessen. Diese sogenannten «voids» enthalten nur sehr wenige helle Galaxien. Ihre Umrandung ist scharf ausgeprägt, denn die Abstände zwischen den Galaxien in der umhüllenden Schicht sind klein, verglichen mit dem Durchmesser des leeren Gebiets. Die grössten Leergebiete besitzen Durchmesser von 100 Mpc, während die Schichtdicke der Umhüllung nicht über 10 Mpc beträgt. Die angrenzenden Scheiben im Deklinationsbereich unterstützen sehr deutlich die Verstellung einer schaum- oder schwammartigen Verteilung, bei der die Galaxien in den dünnen Wänden von nahezu kugelförmigen leeren Gebieten liegen. Reiche Haufen von Galaxien finden sich an den Stellen, an denen mehrere Wände aneinanderstossen. Die auffallendste Struktur, die besonders deutlich hervortritt, wenn man den Deklinationsbereich von 26,5° bis 44,5° in Überlagerung darstellt, ist ein breites Band aus Galaxien, das sich über

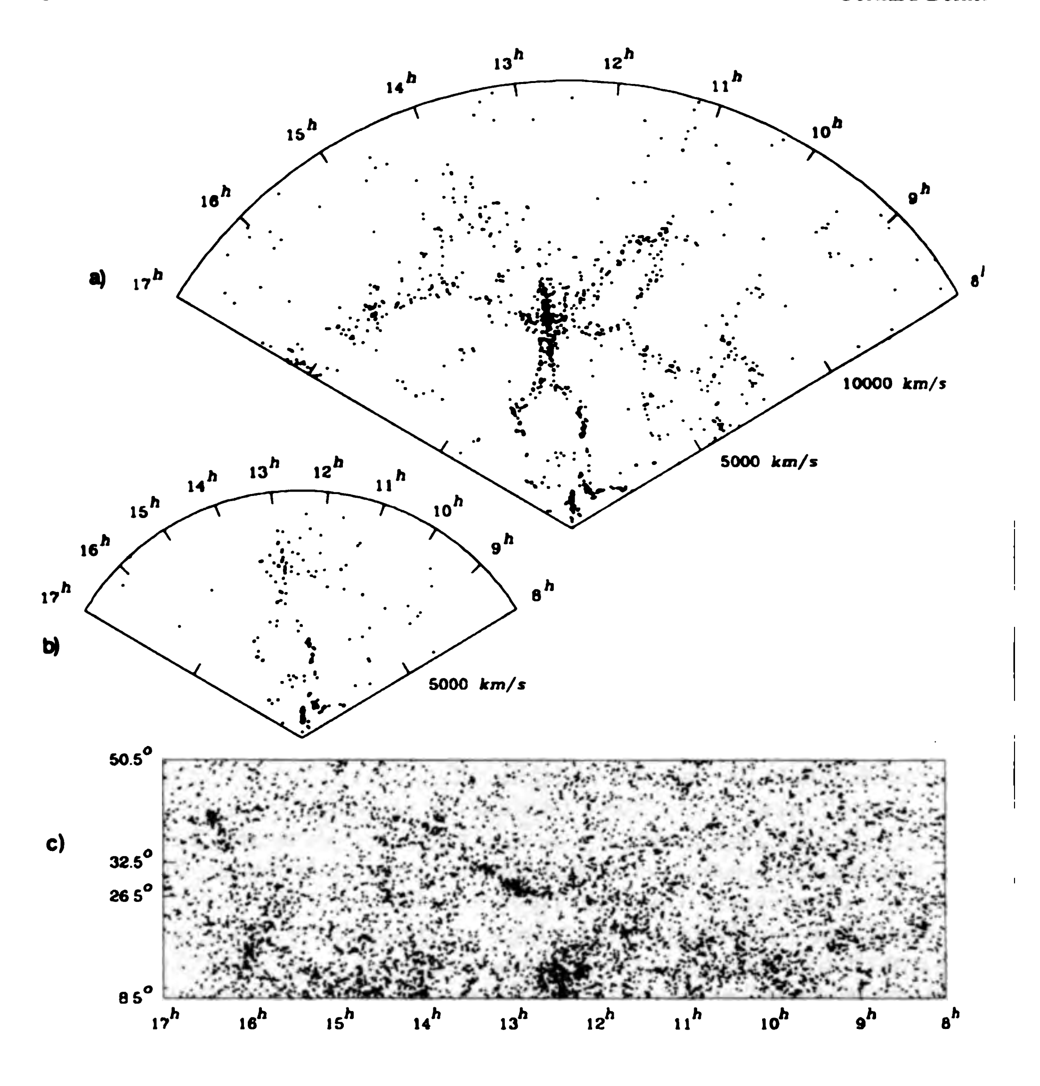


Bild 3 Die Verteilung der Galaxien des Zwickey-Katalogs
a) Das Strichmännchen, dessen Torso der Coma-Haufen ist. Grosse leere Gebiete und dünne Randstreifen sind klar zu erkennen.
b) Dasselbe Bild wie a), nur mit der Grenzhelligkeit $m_B = 14{,}5$, statt 15,5.
c) Die Galaxien, wie sie in der Projektion auf der Himmelskugel erscheinen. Die Koordinaten sind Rektaszension und Deklination.

Fig. 3 The distribution of galaxies in the Zwickey catalog.
a) The stickman with the Coma cluster presenting the torso. Large empty region and sharp boundary layers are prominent features.
b) The same as a) except with limiting magnitude $m_B = 14.5$, instead of 15.5.
c) The galaxies in projection on the celestial sphere. The coordinates are rectascension and declination.

die ganze Längenausdehnung der Durchmusterung erstreckt und das zwischen Rotverschiebungen von 7500 km s^{-1} und 10000 km s^{-1} liegt. Geller und Huchra nannten diese Struktur die «Grosse Mauer» (Bild 4). Sie enthält mehr als die Hälfte der vermessenen Galaxien. Dieses grosse Band ist in seiner Ausdehnung offenbar nur durch die Abmessungen der Durchmusterung begrenzt. Die vollen Ausmasse der «Grossen Mauer» sind noch nicht bekannt. Mindestens 340 Mpc lang und 120 Mpc breit und ca. 10 Mpc dick erstreckt sich diese Struktur bis zum Rand der CfA-Durchmusterung (falls H_0 = 50 km s^{-1} angenommen wird). Die Dichte in dieser Schicht ist etwa fünfmal so hoch wie der mittlere Wert der Galaxiendichte. Mit einem Dichteparameter $\Omega_0 = 0{,}2$ ergibt sich eine Masse von $\sim 2\times10^{16}\,M_\odot$ ($M_\odot$: Sonnenmasse), etwa das 10fache der Masse des Lokalen Superhaufens.

Es ist natürlich eine wichtige Frage, ob die Grosse Mauer wirklich ein real existierendes Gebilde ist. Lässt sie sich vielleicht als zufällige Anlagerung kleinerer Gebilde deuten? Kann die Auswahl der Galaxien durch eine Hellig-

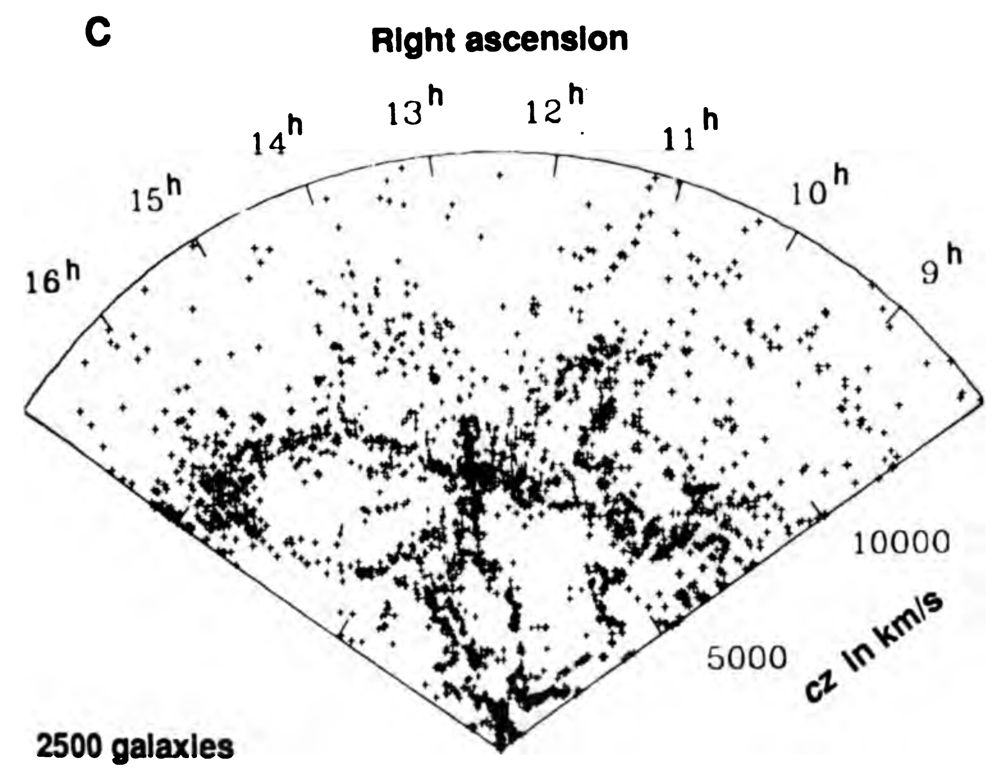


Bild 4 Analoge Darstellung zu Bild 3. Ein grosser Bereich in der Deklination ist in die Zeichenebene projiziert. Das Band aus Galaxien bei cz ~ 7500 km s^{-1} ist die Grosse Mauer.

Fig. 4 A similar plot as in fig. 3. A large range of declination values has been projected onto the celestial sphere. The band of galaxies at cz ~ 7,500 km s^{-1} is the Great Wall.

keitsgrenze einen Verstärkungseffekt vortäuschen, der in Wirklichkeit gar nicht gegeben ist? Einen Effekt dieser Art kann man wohl schon in den Bildern 3 und 4 erkennen. Bei Rotverschiebungen von mehr als 10000 km sec^{-1} werden die Galaxien seltener, da wegen der Helligkeitsgrenze des Katalogs fernere Galaxien nur noch erfasst werden, wenn sie sehr hell leuchten. Die wirkliche Verteilung erscheint also verfälscht, denn viele der Galaxien mit kleiner Rotverschiebung fänden bei grösseren Rotverschiebungen nicht mehr Aufnahme in den Katalog. Durch verschiedene statistische Tests konnte aber überzeugend gezeigt werden, dass die im CfA-survey gefundenen Strukturen tatsächlich existieren und nicht etwa durch die Auswahleffekte bei der Erstellung des Zwickey-Katalogs vorgetäuscht werden.

Die Untersuchungen von Geller und Huchra haben die ersten noch mit Skepsis aufgenommenen Entdeckungen grosser Leerräume oder weit gestreckter Filamente bestätigt (Kirshner et al. 1981; Giovanelli & Haynes 1986) und diese Strukturen als normal für die Verteilung der Galaxien enthüllt. Bis jetzt ist die Ausdehnung der grössten Strukturen nur durch die Grenzen der Durchmusterung bestimmt, Anzeichen für eine tatsächliche obere Grenze gibt es noch nicht. Dies gibt uns die ernüchternde Gewissheit, dass in der Verteilung der leuchtenden Materie die gleichmässige, homogene Struktur des Universums – falls sie wirklich vorhanden ist – noch nicht zu erkennen ist.

Es könnte sein, dass der Ausschnitt des Universums, der vermessen worden ist, noch zu klein ist, um typische mittlere Züge der Gesamtverteilung zu zeigen. Es könnte aber auch sein, dass es – zumindest in der Verteilung der leuchtenden Materie – diese typischen Eigenschaften nicht gibt.

In diesem Zusammenhang ist das Resultat einer sehr tiefen Durchmusterung in einem engen Winkelbereich interessant. In einem «Bleistiftstrahl in Richtung auf den galaktischen Nord- und Südpol wurden Rotverschiebungen von Galaxien bis zu z = 0,3, d.h. bis zu Entfernungen von etwa 2000 Mpc, gemessen (Broadhurst et al. 1990). Die Rotverschiebungen der Galaxien häufen sich bei bestimmten Werten nach einem Muster, das wohl der Vorstellung entsprechen könnte, der Sehstrahl schneide immer wieder durch die Wände von hintereinanderliegenden Zellen. Falls dies zutrifft und die zellartige Struktur in weiteren Messungen bestätigt wird, muss wohl die Vorstellung einer grossräumigen, homogenen Materieverteilung stark modifiziert werden.

4 Grossräumige Geschwindigkeitsfelder

Wenn alle Galaxien der gleichmässigen Hubble-Expansion folgen würden, so entspräche das Rotverschiebungsbild genau der räumlichen Verteilung. Eigenbewegungen der Galaxien führen jedoch zu Abweichungen, die oft beträchtlich sein können. Die Rotverschiebung cz gibt die anscheinende Fluchtgeschwindigkeit längs der Sichtlinie an. Diese enthält die Hubble-Bewegung H_0d und die Komponente längs der Sichtlinie v_p der Pekuliargeschwindigkeit

$$cz = H_0 d + v_p \tag{2}$$

Ein gravitativ gebundenes System, wie z.B. ein dichter Haufen von Gala-
:ien, erscheint durch diesen Effekt in die Länge gezogen, auf den Beobachter
:u. Man spricht vom «Finger Gottes». Der Torso des Strichmännchens in Bild 3
llustriert diesen Effekt – hier erscheint der an sich sphärische Coma-Haufen
tark verzerrt in Beobachtungsrichtung.

Es gibt auch etwas Evidenz, dass neben diesen klar erkennbaren «Fingern
iottes» noch andere grossräumige Eigenbewegungen auftreten. Der Mikrowel-
:nhintergrund zeigt eine Anisotropie der Temperatur von einigen tausendstel
.elvin, die vom Dopplereffekt der sich gegen das Strahlungsfeld bewegenden
rde herrührt. Mit grosser Sicherheit lässt sich aus diesen Beobachtungen
Mather et al. 1990) eine Bewegung der Lokalen Gruppe von Galaxien relativ
ım Strahlungshintergrund von 630 ± 50 km s^{-1} in Richtung ($\alpha = 166° \pm 5°$; $\delta =$
$26° \pm 5°$) ableiten. Da der Mikrowellenhintergrund wegen seiner ausseror-
:ntlich gleichförmigen Verteilung das ideale, bevorzugte Koordinatensystem
ir die kosmologischen Modelle definiert, entspricht diese Bewegung der
okalen Gruppe auch einer entsprechenden Abweichung vom gleichmässigen
ubble-Gesetz.

Der Ursprung dieser grossen Pekuliarbewegung ist noch immer rätselhaft.
war bewirkt der Virgohaufen durch seine Schwerkraftanziehung eine Abwei-
ıung vom Hubble-Fluss von etwa 200 bis 400 km s^{-1} am Ort der Lokalen
ruppe. Dies ist aber zuwenig, und ausserdem weicht die Richtung auf das
entrum von Virgo etwa 45° von der gemessenen Bewegungsrichtung ab.

Vielleicht zeigt sich die Lösung des Rätsels in neueren spektroskopischen
lessungen an einigen hundert elliptischen Galaxien (Lynden-Bell et al. 1988).
lit statistischen Methoden konnte für dieses System eine Veränderung der
ifferenz ($zc - H_0 d$) über die Himmelskugel gefunden werden. Dies entspräche
iner grossräumigen Bewegung von etwa 500 km s^{-1} gleichmässig über Skalen
on $\sim$ 50 Mpc. Ursache dieser Bewegung sollte eine Massenkonzentration sein,
ie publicityträchtig der «Grosse Attraktor» genannt wurde. Bislang wurde
llerdings der Grosse Attraktor noch nicht gefunden, und auch die genaue
.ichtung der grossräumigen Bewegung ist noch unbekannt.

Einige grundlegende theoretische Überlegungen

in sehr natürlicher Weg zur Bildung von Galaxien und Haufen in einem
leichmässigen Universum führt über anfänglich vorhandene kleine Störungen
er Dichte zu deren Anwachsen und schliesslichem Zusammensturz auf Grund
on Gravitationsinstabilitäten. Diese Idee gerät in folgende Schwierigkeit:
lach dem Zeitpunkt der Rekombination können kleine Dichteschwankungen
$= \frac{\delta\rho}{\rho}$ zwar anwachsen, aber nur proportional zum Expansionsfaktor $R(t)$. Sie

können also ihren anfänglichen Wert nur um etwa einen Faktor 1500 steigern (das ist gerade das Verhältnis der Expansionsfaktoren jetzt und zum Zeitpunkt der Rekombination). Die Anfangsgrösse von δ ist aber begrenzt durch die hohe Gleichmässigkeit der Hintergrundstrahlung. Bei adiabatischer Ankopplung zeigen sich Dichtestörungen $\frac{\delta\rho}{\rho}$ als entsprechende Störungen in der Temperatur des Strahlungsfeldes

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = -3\,\frac{\delta T}{T} \tag{3}$$

Beobachtungen der Hintergrundstrahlung in verschiedenen Richtungen ergaben Obergrenzen für Schwankungen auf verschiedenen Winkelskalen, so z.B.

$$\frac{\delta T}{T} < 2 \times 10^{-5}$$

bei einer Skala von 7 Bogenminuten (Readhead et al. 1990). Dies entspricht etwa der Winkelausdehnung eines Galaxienhaufens zur Zeit der Rekombination. Dessen Dichtekontrast ist also auf 6×10^{-5} begrenzt und durch das Anwachsen mit der Expansion auf 0,1 zum jetzigen Zeitpunkt. Jetzt sollte der Dichtekontrast aber viel grösser als 1 sein, entsprechend den Beobachtungen. Die kleinen Störungen können also nicht genügend kräftig heranwachsen. Das Universum bleibt in diesem Modell ziemlich homogen. Deshalb kann das natürliche Modell für die Entstehung der Galaxien nicht funktionieren.

Ein Ausweg aus diesem Dilemma, der in den letzten Jahren häufig beschritten wurde, besteht darin, dass man nichtleuchtende «dunkle» Materie für die Strukturbildung im wesentlichen verantwortlich macht. Besonders hypothetische nichtbaryonische Materie bietet hier viele Möglichkeiten, hat allerdings den Nachteil, dass Objekte wie Neutrinos mit Masse, Axionen oder kosmische «Strings» experimentell noch nicht gefunden wurden. Ein Untergrund aus solchen Objekten hat keine direkte Wechselwirkung mit Photonen, kann grössere Anfangsamplituden δ besitzen als normale Materie, hat grössere Anwachszeiten und kann die Schwerkraftzentren vorgeben, in denen dann die normale baryonische Materie sich ansammelt. Die leuchtende Materie, also die dünnen Wände und Schichten, wie Geller und Huchra sie finden, wären sozusagen die Spitze eines Eisbergs aus dunkler Materie, die im Grossen viel gleichmässiger verteilt ist.

Man kann versuchen, diesen Aspekt darzustellen in numerischen Rechnungen, in denen man den Teilchen der dunklen Materie folgt. An Punkten, an denen die Dichte einen vorgegebenen Wert überschreitet, postuliert man dann die Entstehung einer Galaxie und trägt schliesslich nur diese Punkte graphisch auf. Bild 5 ist ein auf diese Weise entstandenes Muster von Galaxien und ihrer grossräumigen Verteilung (Buchert & Klaffl 1990). Diese Rechnung wurde im Rahmen einer analytischen Approximation, die der sowjetische Astrophysiker

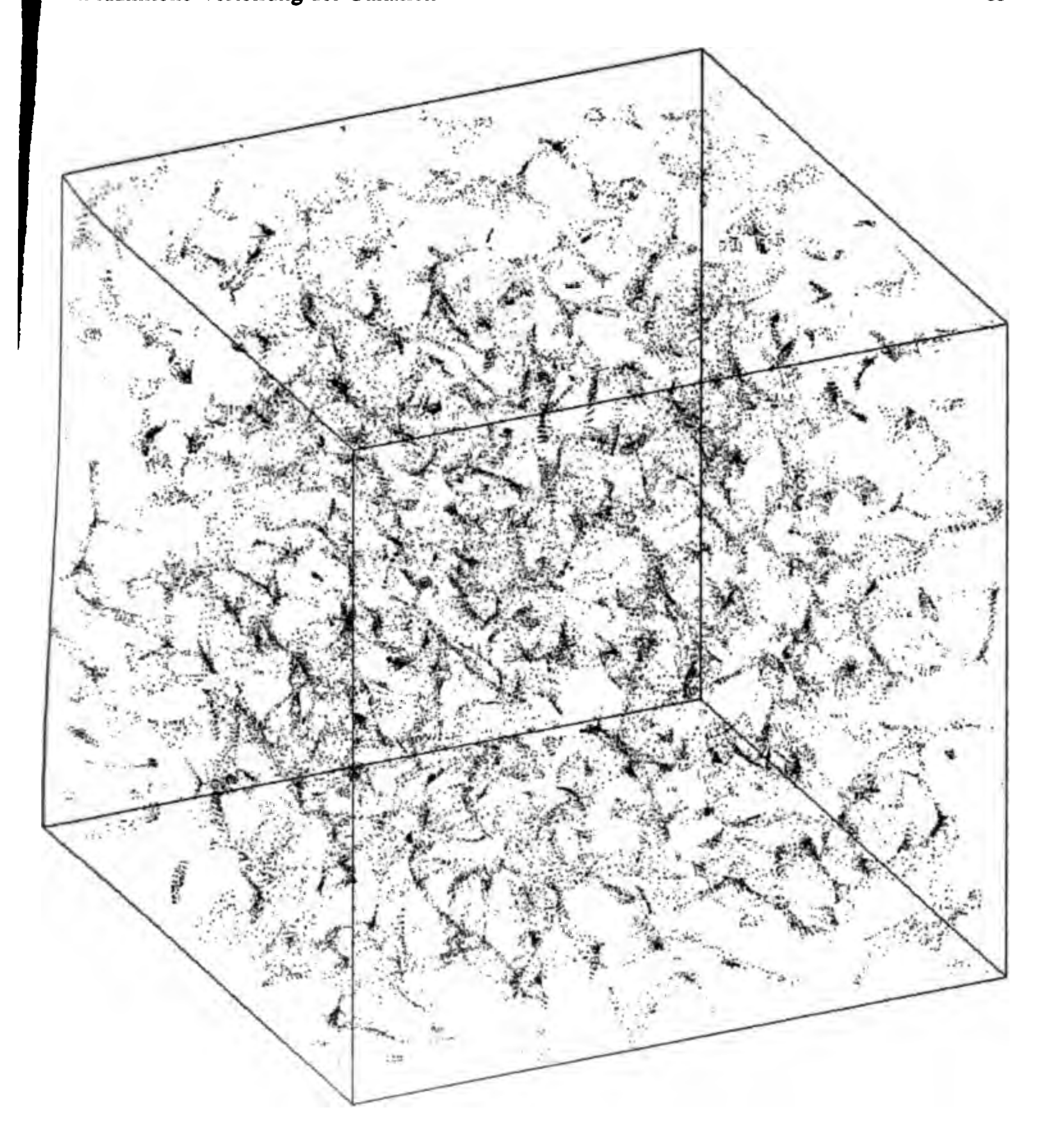


Bild 5 Eine numerische Simulation zum Pfannkuchenmodell. Die einzelnen Punkte sollten Galaxien entsprechen. Eine Vielzahl von Formen und Strukturen ist erkennbar. Die Kantenlänge des Würfels entspricht 450 Mpc; d.h. die Beobachtungen aus Bild 3 oder 4 wären in $^1/_{16}$ dieses Volumens enthalten.

Fig. 5 A numerical simulation for the pancake model. The points correspond to galaxies. A number of shapes and structures can be seen. The edge of the cube has a length of 450 Mpc; i.e. the data of fig. 3 or fig. 4 would be contained within $^1/_{16}$ of this volume.

Ya. B. Z'eldovich vorgeschlagen hatte, durchgeführt. Man verfolgt dabei die Bahnkurven von Teilchen, die sich ohne gegenseitige Stösse bewegen, aber Gebiete hoher Dichte entstehen lassen durch die Überschneidung der Bahnen. Die allgemeine Struktur dieser Gebiete hoher Dichte entspricht einer eindimensionalen Bewegung, d. h. der Bewegung auf eine Ebene zu. Anfangs ausgedehnte Gebiete kollabieren also in eine platte Form, einen «Pfannkuchen». Daher stammt der Name «Pfannkuchenmodell» für dieses Bild.

Wie aus Bild 5 zu ersehen ist, kann dieses Modell verschiedene qualitative Züge der Beobachtungen gut wiedergeben. Die Zellstruktur ist erkennbar, grosse leere Gebiete umgeben von dünnen Wänden sind vorhanden wie in Bild 3.

So eindrucksvoll diese Übereinstimmungen erscheinen mögen, so sollte doch angemerkt werden, dass zu einem wirklich quantitativen Modell noch vieles fehlt: Realistische Anfangsbedingungen müssen noch eingebaut werden, und speziell die Beschreibung der Bildung einzelner Galaxien ist noch nicht befriedigend gelöst. Trotzdem möchte ich dem Leser viel Freude wünschen bei seinen eigenen Untersuchungen von Bild 5 und der Analyse der Strukturen, die darin zu entdecken sind.

6 Literatur

Börner G., 1988, The Early Universe, Springer Verlag.
Broadhurst T.J., Ellis R.S., Koo D.C., Szalay A.S., 1990, Nature *343*.
Buchert T., Klaffl R., 1990, in Vorbereitung.
deLapparent V., Geller M.J., Huchra J.P., 1986, Astrophys. J. *302*, L1.
Geller M.J., Huchra J.P., 1989, Science *246*, 897.
Haynes M.P., Giovanelli R., 1986, Astrophys. J. *306*, L 55.
Kirshner R.P., Oemler A., Schechter P., Shectman S.A., 1981, Astrophys. J. *248*, L 57.
Lynden-Bell D. et al., 1988, Astrophys. J. *326*, 50.
Mather J.C. et al., 1990, Astrophys. J. Lett *354*, L 37.
Readhead A.C.S. et al., 1989, Astrophys. J. *346*, 566.

Prof. Dr. G. Börner, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, D-8046 Garching bei München.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/1: 13–50

Gefässverschluss-Mechanismen in Laubbäumen[1]

Karel J. M. Bonsen, ETH Zürich

Von den in der Schweiz einheimischen und einigen eingeführten Laubholzarten wurden 65 Arten aus 45 Gattungen und 24 Familien auf Gefässverschlüsse untersucht. Vorkommen, Typen und Beschaffenheit der Gefässverschlüsse werden angeführt. Die schweizerischen Laubbaumarten weisen zwei Haupttypen von Gefässverschlüssen auf: Gummi und Thyllen. Ob eine Pflanze nur Gummi oder auch Thyllen bildet, hängt von der Grösse der Öffnungen der Gefäss-Parenchym-Tüpfel ab. Ist diese grösser als 3 µm, dann werden Thyllen gebildet. In den ersten angiospermen Pflanzen sind die Gefässe mit Thyllen verschlossen worden. Durch Verkleinerung der Tüpfel entstand später ein Verschluss mittels Gummi, wobei mit der Zunahme der Gefässdurchmesser sekundär wieder Verschluss mittels Thyllen entstand. Es werden verschiedene Aspekte diskutiert wie: Zusammenhänge zwischen der Art des Gefässverschlusses und der Baumart, Auslösung (Ursachen, äussere Bedingungen), Ontogenie (Entstehung, Entwicklung, Anfang und Dauer des Prozesses), Funktion, technologische Konsequenzen und Möglichkeiten zur Verhütung der Gefässverschlüsse. Die Gefässverschlussbildung kann durch einen erhöhten Sauerstoffgehalt, durch pflanzeneigene Stoffe, Mikroorganismen oder durch eine Unterbrechung der osmotischen Druckregulierung der Parenchymzellen ausgelöst werden. Gefässverschluss stellt sich nur ein, wenn die Parenchymzellen vital genug sind, genügend Wasser und Stärke verfügbar sind und die Temperatur im richtigen Bereich liegt. Gefässverschlüsse sind ein Teil der Kompartimentierung des Holzes.

Vessel occlusions in hardwoods

Vessel occlusions in 65 species (45 genera, 24 families) have been investigated. Occurrence, types and morphology are given, relations between occlusion type and tree species, initiation (causes, circumstances), development, function, technological consequences and the prevention of vessel-occlusions are discussed. The study is based on a literature survey. Swiss grown woods show two main types of vessel occlusions: tyloses and gums. Whether a plant produces gums only, or gums and tyloses depends on the gap size of the vessel-parenchyma-pits; is this larger than 3 µm tyloses are produced. In evolution the first angiosperms occluded their vessels with tyloses. Later the pit sizes decreased and the plants occluded their vessels by gum plugs. Because of the increasing vessel diameter plants had to return to tylosis formation secondarily. Tylose formation is initiated by oxygen, hormones (endogeneous or microorganisms' hormones), or a break-down of the osmotic regulation of the parenchyma cells. Occlusion of vessels only takes place when the parenchyma cells are vital enough, when there is sufficient water and starch available and when the temperature range is right. Taking part in the compartmentalization is the primary function of vessel occlusions.

1 Einleitung

Das Wasserangebot, der Wassertransport und die Transpiration der Baumpflanzen sind eng miteinander korreliert: Je umfangreicher und exponierter die transpirierenden Organe ausgebildet sind, um so dringender erweist sich die Notwendigkeit, das verdunstende Wasser zu ersetzen (E. Strasburger et al.,

[1] Aus Karel J. M. Bonsen: Gefässverschluss-Mechanismen in Laubbäumen. Diss. ETH. Nr. 9125 (1990). Die Arbeit ist vom Schweizerischen Nationalfonds mitfinanziert worden, was hier mit bestem Dank vermerkt sei.

1971). Die Transportgeschwindigkeit des durch Parenchymzellen diffundierenden Wassers reicht dazu nicht aus. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass sich im Laufe der Phylogenie besondere Wasserleitsysteme ausbilden konnten: In Laubbäumen sind es die effizienten Gefässe, die im funktionstüchtigen Zustand das Bodenwasser und die darin gelösten Nährsalze den Verbraucherorten in der Krone zuführen.

Die Gefässe bestehen aus aneinander gereihten, mehr oder weniger gestreckten, tonnenförmigen Einzelzellen oder Gefässgliedern, deren endständige Querwände teilweise oder vollständig aufgelöst worden sind. Die in dieser Weise entstandenen röhrenförmigen Gefässe erreichen Längen von wenigen Dezimetern bis einigen Metern und Durchmesser von wenigen Mikrometern bis zu 0,5 Millimeter. Die Gefässe stehen unter einander und mit dem Parenchymsystem in engem Kontakt und bilden in dieser Art ein vielfältig verflochtenes Netzsystem.

In Baumpflanzen werden die Gefässe der inneren Stammteile bei der Umwandlung von Splint- zu Kernholz regelmässig, in Holzarten mit weitlumigen Gefässen sogar schon im inneren Splintholz verschlossen. Am Gefässverschluss können Thyllen, Gummistoffe oder Calciumcarbonat beteiligt sein. Thyllen werden umschrieben als Auswüchse benachbarter Markstrahl- oder Längsparenchymzellen durch die gemeinsamen Tüpfel mit den Gefässen. Gummistoffe sind sekundäre Metabolite, welche wiederum aus Parenchymzellen durch die Tüpfelung in die Gefässlumina eingelagert werden. Calciumcarbonat aber bildet sich nach chemischen Reaktionen in den Gefässen selbst (S. J. Record, 1927). Der Gefässverschluss ist für die Baumpflanze von grosser physiologischer Bedeutung (Unterbrechung von Leitbahnen), er wirkt sich auch aus bei der Grünastung oder in der «Baumchirurgie» (Verhütung von Infektionen). In technologischer Hinsicht haben verschlossene Gefässe meist negative Konsequenzen, indem dadurch beispielsweise die Holztrocknung, die Imprägnierung, der chemische Holzaufschluss (I. Streslis und H. V. Green, 1962) oder die Herstellung von Streichhölzern (A. J. du Toit, 1964) wesentlich erschwert werden; einzig in der Fassherstellung ist Gefässverschluss erwünscht. Aus allen diesen Gründen ist es naheliegend, die Gefässverschluss-Mechanismen eingehend zu untersuchen, wobei besonders geachtet werden soll auf exogene und endogene Einflüsse, auf ontogenetische Phänomene sowie systematische Zusammenhänge.

2 Zur Typologie des Gefässverschlusses

2.1 Resultate der systematischen Untersuchungen

Die schweizerischen Laubbaumarten weisen die aus der Literatur bekannten zwei Haupttypen von Gefässverschlüssen auf: Gummi und Thyllen (Tabelle 1 und die Bilder 1 bis 18). Die Gattungen *Acer* und *Fraxinus* haben derartig vom allgemeinen Bild abweichende Gefässverschlüsse, dass sie hier ausführlicher besprochen werden.

1 Der Kernholztypus (OFK = obligatorisches Farbkernholz, FFK = fakultatives Farb-
.z), das Vorkommen von makroporen Gefässen (MP), Gefässverschluss-Typus und Vor-
n (GV-obl. = Gefässverschlüsse obligatorisch) und minimum Tüpfel-Durchmesser (MTD)
er Schweiz wachsenden Baum- und Straucharten (+ = Merkmal vorhanden, – = Merkmal
orhanden, (+) = Merkmal nicht immer vorhanden). Die Holzarten sind alphabetisch nach
: geordnet.

Heartwood type (OFK = obligatory coloured heartwood, FFK = facultatively coloured
ood), the presence of macroporous vessels (MP), vessel-occlusion type and presence
l. = vessel occlusions always present), and minimum pit diameter (MTD) of Swiss growing
ermeous tree and shrub species (+ = character present, – = character absent, (+) = character
ays present). The species are given in alphabetical sequence within their family.

	OFK	FFK	MP	GV-obl.	Thyllen	Gummi	MTD < 3 µm
impestre	–	(+)	–	–	–	+	+
atanoides	–	(+)	–	–	–	+	+
'eudoplatanus	–	(+)	–	–	–	+	+
uifolium	–		–	–	–	+	+
helix	–		–	–	+	–	–
'lutinosa	–	(+)	–	–	–	+	+
ncana	–	(+)	–	–	–	+	+
pubescens	–	(+)	–	–	–	+	+
pendula	–	(+)	–	–	–	+	+
sempervirens	–		–	–	–	+	+
:us nigra	+		–	+	+	–	–
um lantana	–		–	–	–	+	+
um opulus	–		–	–	–	+	+
oricarpos albus	–		–	–	–	+	+
us betulus	–	(+)	–	–	+	+	–
s avellana	–	(+)	–	–	+	–	–
carpinifolia	–		–	–	+	–	–
ius europaeus	–		–	–	–	+	+
mas	–		–	–	–	+	+
sanguinea	–		–	–	–	+	+
haë rhamnoides	+		–	+	–	+	+
ea sativa	+		+	+	+	–	–
sylvatica	–	(+)	–	–	+	+	–
s cerris	+		+	+	+	–	–
s petraea	+		+	+	+	–	–
s robur	+		+	+	+	–	–
is hippocastanum	–	(+)	–	–	–	+	+
: regia	+	(+)	+	+	+	+	–
um anagyroides	+		–	+	–	+	+
i pseudoacacia	+		+	+	+	+	–
ndron tulipifer	+		–	+	+	–	–
'ia spec.	–		–	–	+	+	–
is excelsior	–	(+)	+	+	–	+	+
is ornus	–	(+)	+	+	–	+	+
um vulgare	–		–	–	+	–	–
i vulgaris	–	(+)	–	–	–	+	+
is orientalis	–	(+)	–	–	+	+	–
is occidentalis	–	(+)	–	–	+	+	–

Name	OFK	FFK	MP	GV-obl.	Thyllen	Gummi	MTD<3 µm
Clematis vitalba	–		–	–	–	+	+
Frangula alnus	+		–	+	+	+	–
Rhamnus catharticus	+		–	+	–	+	+
Amelanchier ovalis	–	(+)	–	–	–	+	+
Crataegus laevigata	–	(+)	–	–	–	+	+
Crataegus monogyna	–	(+)	–	–	–	+	+
Cydonia oblonga	–	(+)	–	–	–	+	+
Malus sylvestris	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus avium	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus domestica	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus cerasus	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus padus	+	(+)	–	+	–	+	+
Pyrus communis	–	(+)	–	–	–	+	+
Rosa villosa	–		–	–	–	+	+
Sorbus aria	–	(+)	–	–	–	+	+
Sorbus aucuparia	–	(+)	–	–	–	+	+
Populus alba	–	(+)	–	–	+	–	–
Populus nigra	–	(+)	–	–	+	–	–
Populus tremula	–	(+)	–	–	+	–	–
Salix spec.	–	(+)	–	–	+	+	–
Tilia cordata	–	(+)	–	–	–	+	+
Tilia platyphyllos	–	(+)	–	–	–	+	+
Celtis australis	+		+	+	+	–	–
Ulmus glabra	+	(+)	+	+	+	+	–
Ulmus laevis	+	(+)	+	+	+	+	–
Ulmus minor	+	(+)	+	+	+	+	–
Vitis vinifera	+		–	+	+	–	–

2.11 Die Gefässverschlüsse in *Acer*

(Siehe auch E.R. Samitca, 1911; S.J. Record, 1927; C.R. Metcalfe und L. Chalk, 1950; A.L. Shigo und E.M. Sharon, 1970; J.P. Rier und A.L. Shigo, 1972; E.M. Sharon, 1972, 1974.)

Die drei untersuchten einheimischen *Acer*-Arten bilden bei Verletzungen neben homogenem immer auch fädigen Gummi (Bild 1). Dieser fädige Gummi gerät durch die Gefäss-Parenchym-Tüpfel ins Gefässlumen. Wenn eine bestimmte Menge von Gummi gebildet worden ist, hört die Gummibildung auf und es entsteht in der Nähe vom GPT ein gummiloser Raum (Bild 9). Dieser leere Raum vergrössert sich soweit, bis er die gegenüberliegende Gefässwand erreicht hat und dadurch die Gummimasse zweiteilt (Bild 10). Durch eine stetig fortschreitende Vergrösserung dieses Hohlraumes werden die zwei Gummi-Pfropfen immer weiter auseinander getrieben. Das kann so weit gehen, dass ein Gummi-Pfropfen auf einen von einer anderen Parenchymzelle gebildeten Gummi-Pfropfen stösst und zusammen mit diesem einen einzigen Pfropfen bildet. Die Gummibildung aus der Parenchymzelle wird abgeschlossen mit der Einlagerung von eher homogenem Gummi, der den Hohlraum auskleidet. Wenn zwei

Gummi-Pfropfen zusammenstossen, befindet sich dieser weniger fädige Gummi in je einer Schicht an der Ober- und Unterseite des Pfropfens.

Fädiger Gummi lässt sich mit der Doppelfärbung (Astrablau, Safranin) nicht kontrastieren. Nur der zuletzt gebildete, weniger fädige Gummi färbt sich etwas, manchmal rötlich, meistens aber bläulich. Mit der JKJ-Reaktion (Stärke-Nachweis) färbt er sich gelb. Mit Phloroglucin/Salzsäure (Lignin-Nachweis) färbt er sich rötlich oder er färbt sich gar nicht. Acridinrot (Lignin-Nachweis) ergibt keine oder eine gelb-rote Verfärbung. Mit Anilinblau (Kallose-Nachweis) färbt er sich nicht. In verdünnter HNO_3 wird die Farbe etwas gelblicher. In konzentrierter HNO_3 färbt sich der fädige Gummi gelb-orange, löst sich aber nicht auf. In konzentrierter HCl färbt er sich gelb-braun und löst sich ebenfalls nicht.

Da fädiger Gummi von diesem Typus in allen drei einheimischen *Acer*-Arten vorhanden war, wurden Äste von anderen *Acer*-Arten inkubiert, um zu kontrollieren, ob sich dieses Merkmal wiederholt. Dazu wurden *Acer cappadocium, A. ginnala, A. japanicum, A. macrophyllum, A. negundo, A. obtusatum, A. palmatum, A. rubrum, A. saccharum* und *A. tataricum* überprüft: das Ergebnis war positiv.

2.12 Die Gefässverschlüsse in *Fraxinus*

Die *Fraxinus*-Arten weisen blasenförmige Gefässverschlüsse auf, welche auf den ersten Blick Thyllen zu sein scheinen, aber beim näheren Studium eher gummiartig sind. Die Gründe, warum die blasenförmigen Gefässverschlüsse in den beiden *Fraxinus*-Arten nicht Thyllen genannt werden, sind folgende:

1. In keinem der untersuchten Exemplare wurde eine offene Verbindung zwischen Blase und Parenchymzelle gefunden (auch Z. Kóràn und W. A. Côté, 1964, waren nicht in der Lage, eine Verbindung sichtbar zu machen, und sie vermuten, dass das Material durch die Tüpfelmembran ins Gefäss gelangt).
2. In allen untersuchten Arten mit Thyllen lassen sich die Thyllen während ihren Entwicklungsstadien blau färben. Erst nach Abschluss ihrer Entwicklung lassen sie sich manchmal rot färben. Die Blasen kennen kein Entwicklungsstadium, in dem sie sich blau färben lassen (Bild 15).
3. Es wurden nur kleine, mehr oder weniger «dickwandige» oder grosse, sehr «dünnwandige» Blasen angetroffen (Wanddicke der dünnwandigen $< 0{,}5$ μm, H. H. Bosshard, 1953; siehe auch C. M. Moeller und K. Gram, 1959; Z. Kóràn und W. A. Côté, 1964, 1965, kamen auf 0,05 μm für *F. americana*) (Bild 5). Zwischenstadien wurden nie gefunden.
4. Die grossen, «dünnwandigen» Blasen sind meistens zusammengeschrumpft, oder man findet nur noch zerknitterte Teilstücke in den Gefässen (Bilder 5 und 16; siehe auch Z. Kóràn und W. A. Côté, 1964, welche weiter bemerken, dass die sogenannten *Fraxinus*-Thyllen nie mit anderen Thyllen oder der Gefässwand verwachsen sind, wie das bei allen anderen Arten mit Thyllen der Fall ist, und dass die Wand nicht wie eine normale Zellwand aussieht).

Name	OFK	FFK	MP	GV-obl.	Thyllen	Gummi	MTD<3 µm
Clematis vitalba	–		–	–	–	+	+
Frangula alnus	+		–	+	+	+	–
Rhamnus catharticus	+		–	+	–	+	+
Amelanchier ovalis	–	(+)	–	–	–	+	+
Crataegus laevigata	–	(+)	–	–	–	+	+
Crataegus monogyna	–	(+)	–	–	–	+	+
Cydonia oblonga	–	(+)	–	–	–	+	+
Malus sylvestris	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus avium	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus domestica	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus cerasus	+	(+)	–	+	–	+	+
Prunus padus	+	(+)	–	+	–	+	+
Pyrus communis	–	(+)	–	–	–	+	+
Rosa villosa	–		–	–	–	+	+
Sorbus aria	–	(+)	–	–	–	+	+
Sorbus aucuparia	–	(+)	–	–	–	+	+
Populus alba	–	(+)	–	–	+	–	–
Populus nigra	–	(+)	–	–	+	–	–
Populus tremula	–	(+)	–	–	+	–	–
Salix spec.	–	(+)	–	–	+	+	–
Tilia cordata	–	(+)	–	–	–	+	+
Tilia platyphyllos	–	(+)	–	–	–	+	+
Celtis australis	+		+	+	+	–	–
Ulmus glabra	+	(+)	+	+	+	+	–
Ulmus laevis	+	(+)	+	+	+	+	–
Ulmus minor	+	(+)	+	+	+	+	–
Vitis vinifera	+		–	+	+	–	–

2.11 Die Gefässverschlüsse in *Acer*

(Siehe auch E.R. Samitca, 1911; S.J. Record, 1927; C.R. Metcalfe und L. Chalk, 1950; A.L. Shigo und E.M. Sharon, 1970; J.P. Rier und A.L. Shigo, 1972; E.M. Sharon, 1972, 1974.)

Die drei untersuchten einheimischen *Acer*-Arten bilden bei Verletzungen neben homogenem immer auch fädigen Gummi (Bild 1). Dieser fädige Gummi gerät durch die Gefäss-Parenchym-Tüpfel ins Gefässlumen. Wenn eine bestimmte Menge von Gummi gebildet worden ist, hört die Gummibildung auf und es entsteht in der Nähe vom GPT ein gummiloser Raum (Bild 9). Dieser leere Raum vergrössert sich soweit, bis er die gegenüberliegende Gefässwand erreicht hat und dadurch die Gummimasse zweiteilt (Bild 10). Durch eine stetig fortschreitende Vergrösserung dieses Hohlraumes werden die zwei Gummi-Pfropfen immer weiter auseinander getrieben. Das kann so weit gehen, dass ein Gummi-Pfropfen auf einen von einer anderen Parenchymzelle gebildeten Gummi-Pfropfen stösst und zusammen mit diesem einen einzigen Pfropfen bildet. Die Gummibildung aus der Parenchymzelle wird abgeschlossen mit der Einlagerung von eher homogenem Gummi, der den Hohlraum auskleidet. Wenn zwei

Gummi-Pfropfen zusammenstossen, befindet sich dieser weniger fädige Gummi in je einer Schicht an der Ober- und Unterseite des Pfropfens.

Fädiger Gummi lässt sich mit der Doppelfärbung (Astrablau, Safranin) nicht kontrastieren. Nur der zuletzt gebildete, weniger fädige Gummi färbt sich etwas, manchmal rötlich, meistens aber bläulich. Mit der JKJ-Reaktion (Stärke-Nachweis) färbt er sich gelb. Mit Phloroglucin/Salzsäure (Lignin-Nachweis) färbt er sich rötlich oder er färbt sich gar nicht. Acridinrot (Lignin-Nachweis) ergibt keine oder eine gelb-rote Verfärbung. Mit Anilinblau (Kallose-Nachweis) färbt er sich nicht. In verdünnter HNO_3 wird die Farbe etwas gelblicher. In konzentrierter HNO_3 färbt sich der fädige Gummi gelb-orange, löst sich aber nicht auf. In konzentrierter HCl färbt er sich gelb-braun und löst sich ebenfalls nicht.

Da fädiger Gummi von diesem Typus in allen drei einheimischen *Acer*-Arten vorhanden war, wurden Äste von anderen *Acer*-Arten inkubiert, um zu kontrollieren, ob sich dieses Merkmal wiederholt. Dazu wurden *Acer cappadocium, A. ginnala, A. japanicum, A. macrophyllum, A. negundo, A. obtusatum, A. palmatum, A. rubrum, A. saccharum* und *A. tataricum* überprüft: das Ergebnis war positiv.

2.12 Die Gefässverschlüsse in *Fraxinus*

Die *Fraxinus*-Arten weisen blasenförmige Gefässverschlüsse auf, welche auf den ersten Blick Thyllen zu sein scheinen, aber beim näheren Studium eher gummiartig sind. Die Gründe, warum die blasenförmigen Gefässverschlüsse in den beiden *Fraxinus*-Arten nicht Thyllen genannt werden, sind folgende:

1. In keinem der untersuchten Exemplare wurde eine offene Verbindung zwischen Blase und Parenchymzelle gefunden (auch Z. Kóràn und W. A. Côté, 1964, waren nicht in der Lage, eine Verbindung sichtbar zu machen, und sie vermuten, dass das Material durch die Tüpfelmembran ins Gefäss gelangt).
2. In allen untersuchten Arten mit Thyllen lassen sich die Thyllen während ihren Entwicklungsstadien blau färben. Erst nach Abschluss ihrer Entwicklung lassen sie sich manchmal rot färben. Die Blasen kennen kein Entwicklungsstadium, in dem sie sich blau färben lassen (Bild 15).
3. Es wurden nur kleine, mehr oder weniger «dickwandige» oder grosse, sehr «dünnwandige» Blasen angetroffen (Wanddicke der dünnwandigen < 0,5 µm, H.H. Bosshard, 1953; siehe auch C.M. Moeller und K. Gram, 1959; Z. Kóràn und W. A. Côté, 1964, 1965, kamen auf 0,05 µm für *F. americana*) (Bild 5). Zwischenstadien wurden nie gefunden.
4. Die grossen, «dünnwandigen» Blasen sind meistens zusammengeschrumpft, oder man findet nur noch zerknitterte Teilstücke in den Gefässen (Bilder 5 und 16; siehe auch Z. Kóràn und W. A. Côté, 1964, welche weiter bemerken, dass die sogenannten *Fraxinus*-Thyllen nie mit anderen Thyllen oder der Gefässwand verwachsen sind, wie das bei allen anderen Arten mit Thyllen der Fall ist, und dass die Wand nicht wie eine normale Zellwand aussieht).

Bild 9 *Acer campestre* L., Tangentialschnitt, 450:1. Gefässverschluss mittels fädigem Gummi. Die Gummibildung durch die Markstrahlparenchymzellen an der linken Gefässseite ist abgeschlossen, ein Hohlraum ist entstanden.

Fig. 9 *Acer campestre* L., tangential section, 450:1. Vessel occlusion by granular gum. The gum production by the ray cells is finished, a cavity appears.

Bild 10 *Acer campestre* L., Tangentialschnitt, 450:1. Gefässverschluss mittels fädigem Gummi. Ein weiteres Stadium als in Bild 9 wiedergegeben. Der Gummi ist bei der Ausbreitung des Hohlraumes in zwei Hälften geteilt worden, welche nach oben und nach unten gestossen werden.

Fig. 10 *Acer campestre* L., tangential section, 450:1. Vessel occlusion by granular gum. A follow up phase of that in Fig. 9. The gum has been divided and is driven apart upwards and downwards in the vessel.

Bild 11 *Alnus* spec., Tangentialschnitt, 430:1. Gefässverschluss mittels homogenem Gummi. Im linken Gefäss ist deutlich zu sehen, dass der Gummi aus den Parenchymzellen entsteht.

Fig. 11 *Alnus* spec., tangential section, 430:1. Vessel occlusion by homogeneous gum. The vessel on the left shows that the gum is produced by the parenchyma cells.

Bild 12 *Fagus sylvatica* L., Radialschnitt, 555:1. Gefässverschluss mittels Thyllen. Sichtbar sind drei Thyllen und einige Gefässparenchymtüpfel.

Fig. 12 *Fagus sylvatica* L., radial section, 555:1. Vessel occlusion by tyloses. Three tyloses and some vessel-parenchyma pits are visible.

Bild 13 *Aesculus glabra* Willd., Radialschnitt, 385:1. Gefässparenchymtüpfel alternierend, minimaler Tüpfeldurchmesser unter 3 μm.

Fig. 13 *Aesculus glabra* Willd., radial section, 385:1. Vessel-parenchyma pits alternating, minimum pit diameter less than 3 μm.

Bild 14 *Aesculus glabra* Willd., Radialschnitt, 385:1. Gefässparenchymtüpfel teilweise miteinander verschmolzen, minimaler Tüpfeldurchmesser über 3 μm.

Fig. 14 *Aesculus glabra* Willd., radial section, 385:1. Vessel parenchyma pits partly fused, minimum pit diameter over 3 μm.

Bild 15 *Fraxinus excelsior* L., Radialschnitt, 880:1. Gefässverschluss im frühen Entwicklungsstadium.

Fig. 15 *Fraxinus excelsior* L., radial section, 880:1. Vessel occlusion in an early phase of development.

Bild 16 *Fraxinus excelsior* L., Radialschnitt, 435:1. Gefässverschlüsse, durchsichtig.

Fig. 16 *Fraxinus excelsior* L., radial section, 435:1. Vessel occlusions, transparent.

Bild [illegible] *Platanus* spec., Tangentialschnitt, 525:1. Gefässverschluss mittels Thyllen. Thyllen [illegible] mit Protoplasma und Zellkern.

Fig. [illegible] *Platanus* spec., tangential section, 525:1. Vessel occlusion by tyloses. Thinwalled [illegible]

Bild [illegible] Tangentialschnitt, 480:1. Gefässverschluss mittels Thyllen. Eine Thylle [illegible] in eine benachbarte Gefässzelle hineingewachsen.

Fig. [illegible] tangential section, 480:1. Vessel occlusion by a tylosis. The tylosis has [illegible] an adjacent vessel cell through the perforation plate.

9
10
11
12
13
14
15
16
17
18

5. In der Blasenwand wurden nie Tüpfel und in der Blase nie Stärkekörner, ein Zellkern oder Protoplasma gefunden.

Die Blasen färben sich mit Astrablau/Safranin oder mit Phloroglucin-Salzsäure rot, was auf eine Lignifizierung oder Phenolisierung hinweist. Gefärbt mit Astrablau (Zellulose-Nachweis), bleiben sie farblos, ebenso mit Rutheniumrot (Pektin-Nachweis), Anilinblau (Kallose-Nachweis), Acridinrot-Chrysoidin/Astrablau (Lignin-Nachweis) wie auch Sudan IV (Suberin-Nachweis).

Die Blasen entstehen als kleine Tropfen, welche aus den GPT kommen. Meistens entstehen viele gleichzeitig (Bild 5). Diese Tropfen nehmen keine Farbe an, wenn sie noch klein sind und mit den beschriebenen Färbungen behandelt werden. Sind sie grösser, färbt sich der innere Teil rötlich. Verschmelzende Tropfen sind regelmässig zu sehen.

Neben den zwei einheimischen Arten wurden auch ausländische Arten (aus der Holzmuster-Sammlung des Fachbereiches) untersucht. *Fraxinus americana* L., *F. commemoralis* Koidz. (Japan), *F. profunda* (Bush) Bush (Missouri, USA), *F. pennsylvanica* Marsh., *F. quadrangulata* Michx., *F. rhynchophylla* Hance (Korea), *F. sieboldiana* Blume (Hokkaido, Japan), *F. uhdei* (Wengig) Ligelsheim (Guerrero, Mexico), *F. pubinervis* Bl. (Japan), *F. juglandifolia* L., *F. mandshurica* Rupr. (Japan), *F. nigra* Marsh. und *F. oregona* Nutt. wiesen die gleichen GV wie die einheimischen Arten auf.

Schon A. Wieler (1988) machte auf obigen Befund aufmerksam, indem er schrieb, dass die Verstopfungen bei *Fraxinus* weder Thyllen noch Gummi zu sein scheinen. I. H. Isenberg (1933) zog den Schluss, dass die Thyllen von *Fraxinus* spp. hauptsächlich oder ausschliesslich aus Lignin bestehen müssen. Z. Kóràn und W.A. Côté (1965) bemerken, dass die «Thyllenwand» von *F. americana* äusserst dünn (0,05 µm) sein kann und im TEM eine ungewöhnlich hohe Elektronendichte aufweist. Sie waren nicht in der Lage, etwas über die Orientierung der Mikrofibrillen in der Wand zu sagen (R.C. Forster, 1967). S. Ishida und J. Ohtani (1968) fanden in *F. mandshurica* fast ausschliesslich an die Gefässwand anliegende «Thyllen», welche das Gefäss nicht oder nicht mehr verschlossen, und welche keine Wandstrukturen, wie Tüpfel oder Warzen, besassen.

2.2 Gefässverschluss mittels Thyllen

Die Thyllen kann man, wie in der Literatur üblich, in dünnwandige Thyllen (Wanddicke bis 2 µm) und dickwandige Thyllen unterteilen. Die dickwandigen Thyllen färben sich in der Doppelfärbung ausschliesslich rot, während sich die dünnwandigen blau oder rot (mit vielen Übergangsstufen) färben können. Die Thyllenoberfläche kann Warzen haben oder mit einer Warzenschicht («warty layer») bedeckt sein (vergleiche auch mit S. Carlquist, 1956; E. Ott, 1982 und U.M. Bangerter, 1984). In seltenen Fällen wurden spiralenförmige Verdikkungen an der Innenwand der Thylle beobachtet. In Thyllensekundärwänden befinden sich meistens einige oder viele einfache Tüpfel. Diese Tüpfel haben meistens einen Durchmesser von 0,5 bis 1 µm, manchmal bis 1,5 µm.

Als Inhalt der Thyllen kommen Protoplasma, Zellkerne und Stärke vor. Das Vorkommen der beschriebenen Wandausbildungen, Oberflächen-Strukturen, Tüpfelungen und Inhalte in den verschiedenen Familien wird in der Tabelle 2 wiedergegeben. Die Differenzierung der Thyllen bei der Färbung weist auf eine Einlagerung von Lignin oder von Phenolen (rote Farbe) in die ursprüngliche Zellulosewand (blaue Farbe) hin. J. R. Obst et al. (1988) fanden einen Ligningehalt von 28% in den von ihnen untersuchten Thyllen. Lignin und Phenole sind nahe verwandte Stoffe (T. Swain, 1960), welche farblich nicht voneinander zu unterscheiden sind. Solange die Thylle wächst, färbt sie sich blau; sie ist also nicht lignifiziert oder phenolisiert. Wenn sie ausgewachsen ist, lässt sie sich rot färben oder bleibt blaufarbig. Während des Wachstums besteht die Thyllenwand aus 2 bis 3 Schichten. Diese ist aus Zellulose und Pektin aufgebaut, und wenn sie ihre endgültige Grösse hat, kann sie lignifiziert und/oder mit Phenolen imprägniert werden. Auch ist es möglich, dass nach Abschluss des Grössenwachstums zusätzlich ein oder mehrere Wandschichten angelegt werden. Diese Thyllensekundärwand ist vielfach gut erkennbar an ihren Tüpfeln.

Tabelle 2 Thyllenmorphologie und Thylleninhalt in den untersuchten Familien. Wand: d = dünnwandig, D = dickwandig, b = blaufarbig, r = rotfarbig; Oberfläche: W = Warzen, L = Warzenschicht; Tüpfel: + = anwesend; Inhalt: P = Protoplasma, K = Zellkern, S = Stärke; Spiralen = spiralenartige Verdickungen.

Table 2 Tylosis morphology and tylosis contents of the families. Wand = wall: d = thinwalled, D = thickwalled, b = blue stained, r = red stained; Oberfläche = surface: W = warts, L = warty layer; Tüpfel = pits; + = present; Inhalt = content: P = protoplasma, K = nucleus, s = starch; Spiralen = spiral thickenings.

Familie	Wand	Oberfl.	Tüpfel	Inhalt	Diverses
Araliaceae	d/b				
Caprifoliaceae	d/b	L		P	
Carpinaceae	d/b, d/r, D/r			P, K	Spiralen
Fagaceae	d/b, d/r, D/r	W, L	+	P, S	
Juglandaceae	d/b, d/r, D/r	L	+	P, K	
Leguminosae	d/b, d/r, D/r		+	P, K, S	
Magnoliaceae	d/b			P, K	
Oleaceae	d/b			K	
Platanaceae	d/b, d/r, D/r		+	P, K	
Rhamnaceae	d/b				
Salicaceae	d/b, d/r, D/r	W		K	
Ulmaceae	d/b, d/r, D/r	W, L	+	P, K	Spiralen
Vitaceae	d/b, d/r			P, K, S	

2.3 Gefässverschluss mittels Gummi-Einlagerungen

Der Gummi kommt normalerweise als homogen strukturierte Masse vor, welche als homogener Gummi bezeichnet wird (Bilder 7, 8 und 11); sie färbt sich mit der angewandten Doppelfärbung entweder blau oder rot. In inkubierten

Aststücken ist zu beobachten, dass sich der erstgebildete Gummi (d. h. der erste Gummi, welcher von einer Parenchymzelle ins Gefäss abgelagert wird) blau färbt und der später gebildete Gummi (d.h. Gummi, welcher später von der gleichen Parenchymzelle ins Gefäss abgelagert wird) meistens rot. Auch kommt es vor, dass nur blaufarbiger Gummi gebildet wird. Bei den *Fraxinus*-Arten sind Gummitropfen und grosse, sehr dünnwandige «Blasen» oder «Ballone» anzutreffen. Diese Blasen sehen aus wie Thyllen, reagieren histo-chemisch aber wie Gummi. Weil sie aussehen wie Thyllen, chemisch aber anders reagieren als die für die anderen Holzarten beschriebenen Thyllen, werden diese Strukturen weiter «Fraxinus-Thyllen» oder «Eschen-Thyllen» genannt. Neben homogenem Gummi kommt in einzelnen Fällen (bei *Acer* immer) fädiger Gummi vor, welcher trotz der Doppelfärbung meistens farblos bleibt und selten ein wenig bläuliche oder rötliche Farbe annimmt. Ungefärbt haben beide Gummiarten eine gelbliche bis bräunliche Farbe. Der fädige Gummi hat ein körniges Aussehen, besteht aber nicht aus Körnern, sondern aus Fäden (Bild 1). Dieses und die Tatsache, dass beide Gummiarten dicht nebeneinander im Holz, aber nie im gleichen Gefäss vorkommen, könnte auf das Entstehen dieser fädigen Gummipfropfen in Wasser gefüllten Gefässen hinweisen. Dies dann im Gegensatz zu homogenem Gummi, welcher in Gas gefüllten Gefässen entsteht. Die bei Infektionen häufig vorkommenden Schleime oder Gele, welche die Gefässe verstopfen können, dürfen nicht mit Gummi verwechselt werden, denn sie entstehen nicht durch Aktivität von Parenchymzellen, sondern nach A. E. Dimond (1970) unter Einfluss von pektolytischen Enzymen mikrobiellen Ursprungs direkt aus Gefässwandmaterial.

Die gleiche Farbreaktion wie bei Thyllen finden wir beim Gummi. Das ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der zuerst gebildete Gummi lignin- und/oder phenolfrei ist und der später gebildete Gummi zusätzlich Lignin und/oder Phenole enthält. Nach J. Wiesner (1885a, 1885b) wäre es möglich, dass der Gummi Eiweiss enthält, welches sich mit Astrablau blau färbt; dies wäre eine Erklärung dafür, dass der fädige Gummi farblos bleibt. Man nimmt nämlich an, dass einerseits diese Gummigebilde immer in Gefässen entstehen, die mit Wasser gefüllt sind, und dass andererseits das Eiweiss aus dem Gummi herausdiffundiert und im Wasser gelöst wird.

3 Verursachungsprinzipien

Aus den Beschreibungen der untersuchten Holzarten geht hervor, dass die einen nur in der Lage sind, Gummi zu bilden, die anderen aber Thyllen und manchmal auch Gummi (die Gefässverschlüsse in *Fraxinus* spp., die Eschen-Thyllen, werden im nachfolgenden unter den Thyllen eingegliedert). Weshalb sind nicht alle Holzpflanzen in der Lage, ihre Gefässe durch Thyllenbildung zu verschliessen?

Untersucht man Zusammenhänge zwischen dem Vorkommen eines Gefässverschluss-Typus und verschiedener anderer Parameter wie:

ZEIGERWERTE
Feuchtezahl, Reaktionszahl, Nährstoffzahl, Humuszahl, Dispersitätszahl, Lichtzahl, Temperaturzahl, Kontinentalitätszahl (nach E. Landolt, 1977)

MORPHOLOGIE
Lebensform (Baum, Strauch, Kletterer, Liane, immergrün, sommergrün)
Höhe und Stammdurchmesser
Strategie (Pionier-Pflanze, Herrscher-Pflanze)
Wurzelsystem (oberflächig, tiefgehend)
Zweigdurchmesser
Blattgrösse
Blattdicke

HOLZANATOMIE, MAKROSKOPISCH
Splintholzbreite
Kernholztypus
Raumdichte
Dauerhaftigkeit

HOLZANATOMIE, MIKROSKOPISCH
MTD (minimaler Tüpfel-Durchmesser; Bild 19)
MGD (maximaler Gefäss-Durchmesser)
Gefässdurchbrechungs-Typus
Anwesenheit von Schraubenverdickungen
Gefässanteil
Markstrahlanteil
Markstrahltypus

VERSCHIEDENES
Wassergehalt des Holzes
Vorkommen der Gattungen (tropisch, subtropisch, mediterran, gemässigt, boreal)
Phylogenie (nach A. Takhtajan, 1966; K. R. Sporne, 1974),

dann werden mögliche Zusammenhänge sichtbar zwischen dem MGD und der Phylogenie und ebenfalls sehr deutliche zwischen dem MTD.

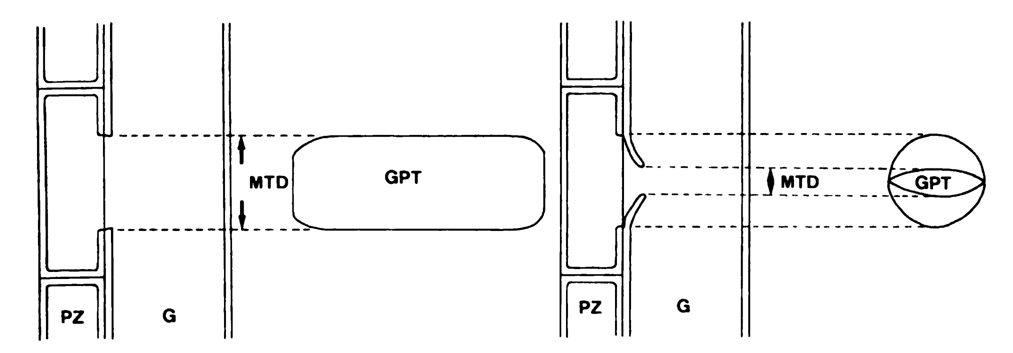


Bild 19 Gefässparenchymtüpfel (GPT) mit Angaben ihrer minimalen Tüpfeldurchmesser (MTD). PZ = Parenchymzelle, G = Gefäss.

Fig. 19 Vessel-parenchyma pits (GPT) and their minimum pit diameter (MTD). PZ = parenchyma cell, G = vessel.

Tabelle 3 gibt eine phylogenetische Ordnung (nach A. Takhtajan, 1966) der in dieser Arbeit beschriebenen Gattungen inklusive des dazugehörenden Gefässverschluss-Typus. Hieraus wird klar, dass in fast allen Hauptgruppen seines

Systems sowohl Thyllen als auch Gummi als Hauptverschlussmechanismus vorkommen. Sogar auf den Stufen Familie und Reihe kommen beide Gefässverschluss-Typen manchmal noch gemeinsam vor. Die Fagales und die meisten Familien weisen nur einen Gefässverschluss-Typus auf. Ein Vergleich mit der Einteilung von K. R. Sporne (1974) ergibt überhaupt keinen Zusammenhang.

Was den Zusammenhang zwischen Gefässverschluss-Typus und MGD (maximaler Gefässdurchmesser) betrifft, wird aus den Bildern 20 und 21 deutlich,

Tabelle 3 Die systematische Verbreitung der Gefässverschluss-Typen. ○ = Thyllen; * = gummiartige Gefässverschlüsse. Arten mit Thyllen können neben diesen auch gummiartige Gefässverschlüsse aufweisen. Phylogenie nach Takhtajan (1966).

Table 3 Systematic distribution of the vessel-occlusion types. ○ = tyloses; * = gum deposits. In species with tyloses also gums might be found. Phylogeny according to Takhtajan (1966).

HAMAMELIDIDAE	*RANUNCULIDAE*	*DILLENIIDAE*	*ASTERIDAE*
Juglandales *Juglandaceae* – *Juglans* ○	*Ranunculales* *Ranunculaceae* – *Clematis* *	*Salicales* *Salicaceae* – *Populus* ○ – *Salix* ○ *Malvales* *Tiliaceae* – *Tilia* *	*Rubiales* *Caprifoliaceae* – *Lonicera* * – *Sambucus* ○ – *Symphoricarpos* * – *Viburnum* *
	ROSIDAE		
Betulales *Betulaceae* – *Betula* * – *Alnus* * – *Carpinus* ○ – *Corylus* ○ – *Ostrya* ○ *Fagales* *Fagaceae* – *Castanea* ○ – *Fagus* ○ – *Quercus* ○	*Rosales* *Leguminosae* – *Laburnum* * – *Robinia* ○ *Platanaceae* – *Platanus* ○ *Rosaceae* – *Crataegus* * – *Amelanchier* * – *Prunus* * – *Malus* * – *Pyrus* * – *Rosa* * – *Sorbus* *	*Geraniales* *Simaroubaceae* – *Ailanthus* * *Sapindales* *Aceraceae* – *Acer* * *Aquifoliaceae* – *Ilex* * *Buxaceae* – *Buxus* * *Hippocastanaceae* – *Aesculus* *	*Rhamnales* *Rhamnaceae* – *Frangula* ○ – *Rhamnus* * *Vitidaceae* – *Vitis* ○ *Celastrales* *Celastraceae* – *Euonymus* * *Oleales* *Oleaceae* – *Fraxinus* ⊛ – *Ligustrum* ○ – *Syringa* *
Urticales *Ulmaceae* – *Celtis* ○ – *Ulmus* ○	*Umbelliflorae* *Araliaceae* – *Hedera* ○ *Cornaceae* – *Cornus* *		
Magnoliaceae – *Liriodendron* ○ – *Magnolia* ○			

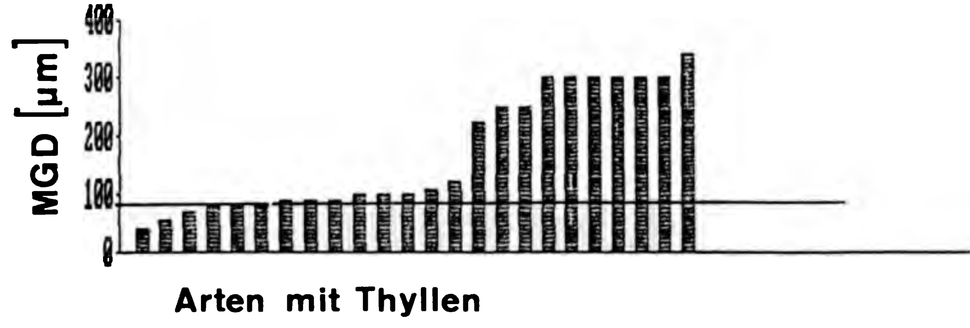


Bild 20 Zusammenhang zwischen dem maximalen Gefässdurchmesser (MGD) und dem Vorkommen von Thyllen. Aufgeführt sind alle Arten mit Thyllenverschluss. Die 80-µm-Grenze ist angegeben; siehe Text.

Fig. 20 Relationship between the maximum vessel diameter (MGD) and the presence of tyloses. Presented are all species with tyloses. The 80 µm level is indicated.

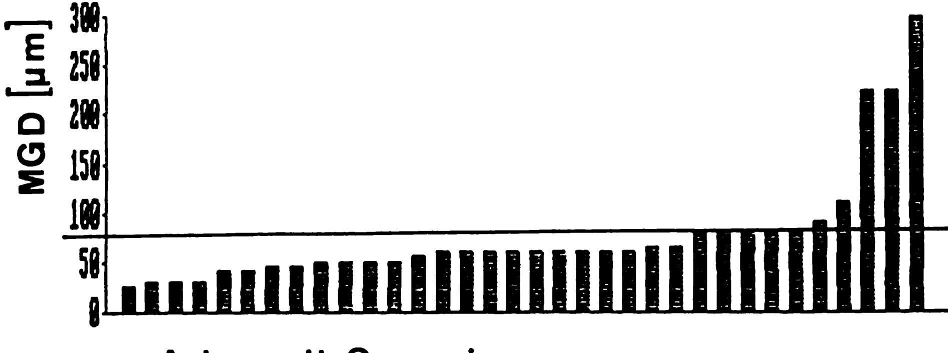


Bild 21 Zusammenhang zwischen dem maximalen Gefässdurchmesser (MGD) und dem Vorkommen von Gummi. Aufgeführt sind alle Arten mit Gummiverschluss. Die 80-µm-Grenze ist angegeben; siehe Text.

Fig. 21 Relationship between the maximum vessel diameter (MGD) and the presence of gum. Presented are all species which produce gum only. The 80 µm level is indicated.

dass der Thyllenverschluss bei den grösseren Gefässen häufiger vorkommt. Gefässe, welche grösser als 80 µm sind, werden mit einigen Ausnahmen, wie z. B. *Clematis*, *Laburnum* und *Betula*, mittels Thyllen verschlossen. Gefässe, welche kleiner als 80 µm sind, werden mit Ausnahme von *Sambucus*, *Magnolia* und *Ligustrum* mittels Gummi verschlossen. Rund um den Grenzwert von 80 µm kommen beide Gefässverschluss-Typen vor.

Arten, welche in der Lage sind, Thyllen zu bilden, haben alle einen MTD (minimaler Tüpfeldurchmesser) von mindestens 3 µm (Bild 22). Dies in Abweichung zu M. M. Chattaway (1949), welche die Grenze bei 8 bis 10 µm fand. Eine Erklärung für diesen Unterschied mag darin liegen, dass sie den Durchmesser des ganzen GPT (Gefäss-Parenchym-Tüpfel) berücksichtigt hat und in der

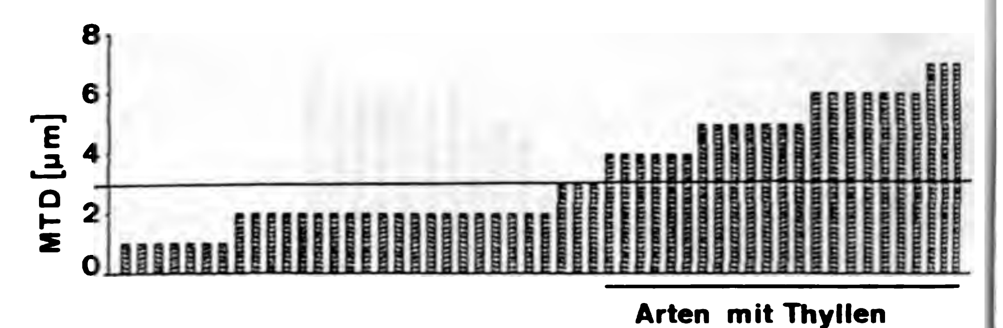


Bild 22 Zusammenhang zwischen dem minimalen Tüpfeldurchmesser (MTD) und dem Vorkommen von Thyllen. Angegeben sind die Arten mit Thyllenverschluss, die restlichen haben Gummiverschluss. Auch angegeben ist die 3-µm-Grenze.

Fig. 22 Relationship between the minimum pit diameter (MTD) and the presence of tyloses. Indicated are species with tyloses, the other species produce gum only. Also indicated is the 3 µm level.

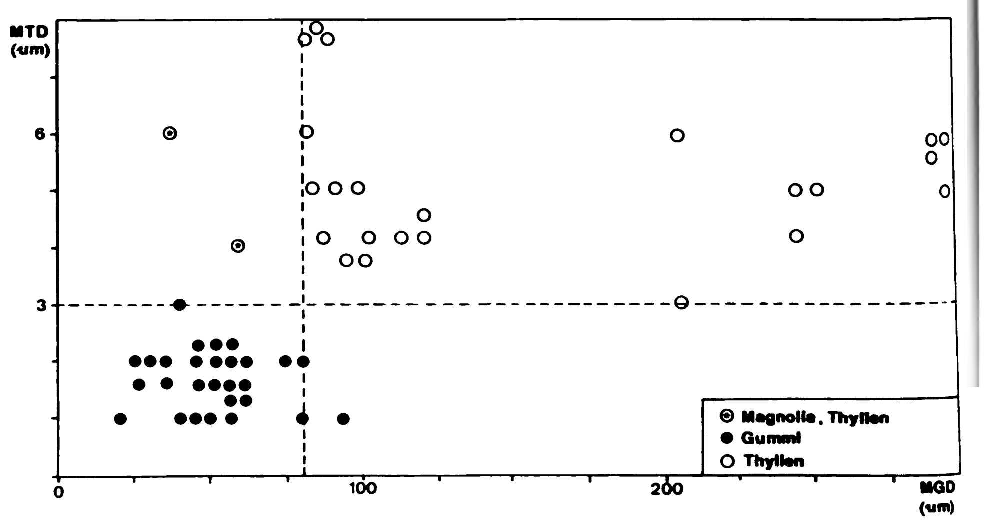


Bild 23 Veranschaulichung der Gruppenbildung durch den Zusammenhang zwischen maximalem Gefässdurchmesser (MGD) und minimalem Tüpfeldurchmesser (MTD). Eingezeichnet sind die 3-µm-Grenze (MTD) und die 80-µm-Grenze (MGD).

Fig. 23 Clustering of wood species by maximum vessel diameter (MGD) and minimum pit aperture diameter (MPD) and the vessel occlusion types found in the wood species. Indicated are the 3 µm level (MTD) and the 80 µm level (MGD).

vorliegenden Studie immer der MTD (Bild 19) bestimmt wurde, weil dieser der Öffnung entspricht, durch die Thyllen in die Gefässe wachsen können. Dass der MTD entscheidend ist für die Möglichkeit, Thyllen bilden zu können, wird durch die Gattung *Aesculus* gezeigt. Die in dieser Arbeit untersuchten Exemplare von *Aesculus hippocastanum* enthielten nie Thyllen. In der Literatur

C. Mäule, 1896; A. Tison, 1900) aber wird das Vorkommen von Thyllen in der ɜattung *Aesculus* beschrieben. Dass die Angaben von C. Mäule und A. Tison nöglicherweise richtig sind, zeigen die amerikanischen *Aesculus*-Arten: *A. ctandra* und *A. glabra* haben meistens Gefässverschlüsse aus Gummi, aber ıanchmal auch Thyllen. Der MTD dieser Arten variiert, das heisst, dass ıanchmal zwei oder mehrere Tüpfel miteinander verschmelzen, wodurch die 3-.m-Grenze überschritten und Thyllenbildung möglich wird (Bilder 13 und 14).

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen MGD und MTD (Abbildungen 0, 21, 22 und 23), dann werden zwei Hauptgruppen deutlich: eine Gruppe mit inem MGD über 80 µm und einem MTD über 3 µm und eine Gruppe von Arten ıit einem MGD unter 80 µm und einem MTD unter 3 µm. Ausnahmen bilden *'lematis vitalba* (eine Liane) und *Magnolia*-Arten.

Da die Beschaffenheit der Gefäss-Parenchym-Tüpfel (der MTD) entscheiend ist für das Vorkommen von Thyllen, ist es von Interesse, das Vorkommen er Gefäss-Parenchym-Tüpfel-Typen innerhalb der Angiospermen zu betrachen. Auf Familienniveau gibt es Familien, in welchen alle Arten eine gleich rosse MTD aufweisen (wie die *Rosaceae*), und Familien, wo verschieden rosse MTD vorkommen (wie die *Caprifoliaceae*). Die meisten Familien aber aben Arten mit gleich grosser GPT. Auf Gattung und Artniveau ist die MTD-irösse mehr oder weniger konstant. Nur jene Gattungen, welche einen MTD on ungefähr 3 µm haben (z. B. *Aesculus*), enthalten Arten, welche Thyllen ilden können oder nicht. Dies kann ausserdem auf dem Artniveau noch variieen. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über den Gefässverschluss-Typus der schweierischen Laubbaumgattungen.

Gefässpflanzen sind unabhängig voneinander in verschiedenen Pflanzenruppen entstanden. Bekannt sind Gefässe in *Selaginella, Equisetum,* in einigen iattungen der Farne (z. B. *Pteridium, Marselia*), in *Gnetum, Ephedra, Welwitchia* und in den Angiospermen (W. L. Stern, 1978). In fast all diesen Gefässflanzen sind Gefässverschlüsse gefunden worden, woraus geschlossen werden ann, dass Gefässverschlüsse eine allgemein vorkommende Erscheinung in iefässpflanzen sind.

Zur Topologie des Gefässverschlusses

:äumlich gesehen kommen Gefässverschlüsse vor in: Nahezu allen Gefässen es obligatorischen Farbkernholzes, in Gefässen, welche mit Gas gefüllt sind der einmal mit Gas gefüllt waren (zur Zeit als diese im Splintholz gelegen aben), und Gefässen von verletzten und/oder infizierten Bereichen (inklusive ıkultatives Farbkernholz).

.1 Gefässverschlüsse und Kernholzbildung

.11 Heute gültige Definitionen

ſit dem Begriff Kernholz ist im allgemeinen der innere Teil eines Baumstam-

mes gemeint, welcher visuell vom äusseren Teil zu unterscheiden ist. Er kann eine dunklere Farbe als das äussere Holz haben (z. B. *Quercus robur*, *Robinia pseudoacacia*, *Juglans regia*) oder heller sein als dieses (*Picea abies*). Wissenschaftler sprechen dann von Kernholz, wenn keine lebenden Zellen mehr im Holz vorhanden sind, selbst wenn kein visueller Unterschied besteht. Neben Kernholz existieren auch Begriffe wie «Nasskern», «Schutzkern», «Schutzholz», «Farbkernholz», «Falschkern», «pathologisches Kernholz», «Rotkern», «Braunkern», «Spritzkern» und «Frostkern». Mit anderen Worten, Farbunterschiede, Holzfeuchtigkeitsunterschiede, Krankheitserscheinungen und Dauerhaftigkeitsunterschiede sind Ausgangspunkte für Benennungen der inneren Teile der Baumkörper. 1964 wurde «Kernholz» von der IAWA definiert als: «Die inneren Zonen im Holz, die im stehenden Stamm keine lebenden Zellen mehr enthalten und in denen die Reservestoffe (zum Beispiel Stärke) in der Regel abgebaut oder in Kernholzsubstanzen umgebaut worden sind. Wirkt meistens dunkler in der Farbe als Splintholz (Farbkernholz), obwohl ein Farbunterschied nicht immer klar zu Tage tritt.» Dass diese Definition unbefriedigend ist, wird aus den Arbeiten von H. H. Bosshard (1953, 1955, 1965a, 1965b, 1966a, 1966b, 1967 und 1968) deutlich. Er unterscheidet:

- Bäume mit verzögerter Kernholzbildung (z. B. *Carpinus betulus*),
- Bäume mit hellem Kernholz (z. B. *Picea abies*),
- Bäume mit obligatorischer Farbkernbildung (z. B. *Quercus robur*),
- Bäume mit fakultativer Farbkernbildung (z. B. *Fraxinus excelsior*).

Dies ergab eine befriedigende Einteilung, wobei davon ausgegangen wurde, dass alle Baumarten Kernholz bilden können und dass diese Kernholzbildung auf eine Alterserscheinung zurückzuführen ist.

4.12 Vorschlag für eine neue Terminologie

Die Resultate der vorliegenden Arbeit machen deutlich, dass die Definition «Kernholz» einer Anpassung bedarf. Die Resultate können in Gefässverschluss-Profilen wiedergegeben werden; es handelt sich dabei um schematische Wiedergaben der Häufigkeit der Thyllen- oder der Gummiverschlüsse innerhalb eines Stamm-Durchmessers, gemessen auf 1,30 m Höhe, wie sie in Bild 24 aufgezeigt werden. Ein vollständiger Verschluss (100%) bedeutet, dass die Gefässe völlig verschlossen sind, was übrigens nicht heissen muss, dass die Gefässe dann vollständig mit Gefässverschlüssen ausgefüllt sind, denn meistens genügt ein Verschluss, um ein ganzes Gefäss zu verschliessen. Anhand dieser Gefässverschluss-Profile können die in dieser Arbeit untersuchten Holzarten in drei Gruppen eingeteilt werden.

Im Stamm von Holzarten, wie *Quercus robur*, *Castanea sativa*, *Robinia pseudoacacia* und *Laburnum anagyroides*, gibt es einen inneren Teil, in dem alle Gefässe verschlossen sind (Bilder 24-1 und 24-2). Dieser Teil fällt mit dem dunkel gefärbten Teil im Stamm zusammen. Ausserhalb dieses dunklen Bereiches gibt es auch noch verschlossene Gefässe. Meistens sind nur die makropo-

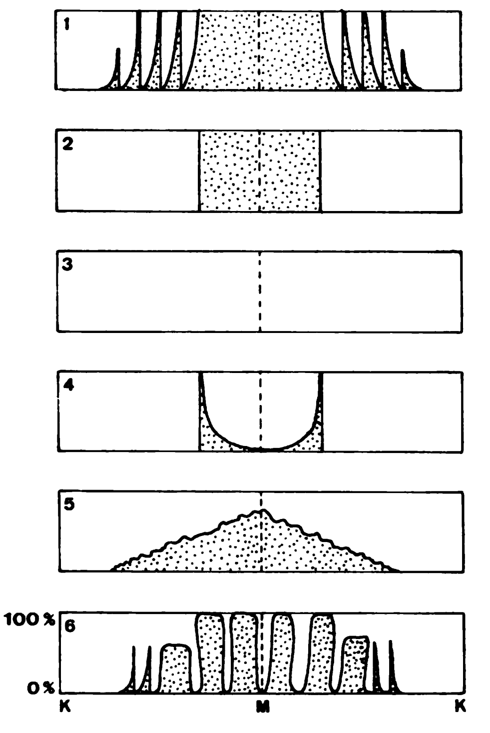


Bild 24 Gefässverschlussprofile. Die Höhe ist ein Mass für den Anteil der verschlossenen Gefässe. Auf der unteren Linie (0 %) sind alle Gefässe offen, auf der oberen Linie (100 %) sind alle Gefässe verschlossen. K = Kambium, M = Mark, 1 = *Quercus robur*, 2 = *Laburnum anagyroides*, 3 = *Fagus sylvatica*, 4 = *Fagus sylvatica* mit Rotkern (fakultativer Kern), 5 = *Salix alba* mit fakultativem Farbkern, 6 = *Juglans regia* mit zonenweise verfärbtem Kern.

Fig. 24 Vessel-occlusion profiles. The percentage occluded vessels is indicated by height. At the lower line (0 %) all vessels are open, at the upper line (100 %) all vessels are occluded. K = cambium, M = pith, 1 = *Quercus robur*, 2 = *Laburnum anagyroides*, 3 = *Fagus sylvatica*, 4 = *Fagus sylvatica* with redheart (facultatively coloured heartwood), 5 = *Salix alba* with facultatively coloured heartwood, 6 = *Juglans regia* with unregular discolourations.

ren Frühholzgefässe verschlossen. Die letztgebildeten Jahrringe sind frei von Gefässverschlüssen.

Bei Holzarten wie *Juglans regia* und *Prunus* spp. ist der Verschluss von Gefässen viel unregelmässiger. Hier gibt es meistens keinen inneren Teil, in dem alle Gefässe verschlossen sind, sondern alternierende Zonen mit mehr oder weniger Gefässverschlüssen. Bei *Juglans* sind zwischen diesen Zonen und dem gefässverschlussfreien Splintholz meistens noch einige Jahrringe vorhanden, in welchen die makroporen Frühholzgefässe verschlossen sind.

Obwohl *Fagus sylvatica* stark zur Thyllenbildung neigt, ist sie meistens frei von Gefässverschlüssen. Jedoch sind in Stämmen dieser Holzart, welche einen Rotkern aufweisen, die Gefässe innerhalb dieses Rotkerns teilweise mit Thyllen verschlossen.

Wie z. B. an *Quercus robur* gezeigt werden konnte (im Kernholz alle Gefässe und auch die makroporen Frühholzgefässe der älteren Jahrringe mit Gefässverschlüssen), gibt es also keinen absoluten Zusammenhang zwischen Kernholzbildung und Gefässverschlussvorkommen.

Es gibt Holzarten, welche ein Holzinneres haben, wo die Gefässe völlig verschlossen (*Quercus* spec. div.), nur zonenweise verschlossen (*Juglans* spec., *Prunus* spec.) und wo keine verschlossenen Gefässe vorhanden (*Fagus sylvatica*, *Betula* spec.) sind. Aus der Literatur und den eigenen Untersuchungen ergibt sich, dass Gefässverschluss-Bildung durch Embolie, toxische Stoffe oder Hor-

mone ausgelöst werden kann. Bei Arten wie *Quercus robur* und *Robinia pseudoacacia* werden die Frühholzgefässe der älteren Splintholz-Jahrringe verschlossen, wenn sie durch Wasserentzug entleert (Embolie) werden (M. H. Zimmermann, 1983). Erst wenn der älteste Splintholz-Jahrring verkernt, werden auch die restlichen Gefässe dieses Jahrrings teilweise oder völlig verschlossen. Dies geschieht möglicherweise unter Einwirkung von Hormonen, welche vom Kambium aus in Richtung Kernholz diffundieren (R. K. Bamber, 1975). Weitere Hinweise für eine Steuerung vom Kambium aus liefern ungefärbt gebliebene Teile im Kernholz, welche durch kambiale Schädigung (D. Dujesiefken, 1989, und A. Frey-Wyssling, 1976) verursacht worden sind. Im verfärbten Kernholz sind also keine gefässverschlussfreien Teile vorhanden. In einer Baumart wie *Fagus sylvatica* verlieren die Parenchymzellen bei älteren Bäumen ihre Vitalität, weil sie nicht mehr mit genügend Energie (Kohlenhydrate), Wasser oder Mineralien versorgt werden. Die Unterversorgung kann durch Mangel oder Alterung (Weber, 1919; König, 1967; Shigo, 1986a, 1986b) entstehen. Wird ein Baum verletzt, dessen Stamminneres nur wenig vitale oder abgestorbene Parenchymzellen enthält, kann Sauerstoff eindringen; dies setzt jedoch voraus, dass das Innere genügend trocken ist, d. h. die Gefässe zum Gastransport fähig sind. Der eingedrungene Sauerstoff verursacht durch die Oxidation von phenolischen Stoffen (A. B. Wardrop und J. Cronshaw, 1962; T. Swain, 1965; K. Sameshima et al., 1967; N. Parameswaran und J. Bauch, 1975) eine Verfärbung des Holzes. Die Verfärbung breitet sich aus, bis der Sauerstoff vitale Parenchymzellen erreicht hat. Diese reagieren, indem sie zu Thyllen auswachsen, dadurch die Gefässe verstopfen, somit eine weitere Ausbreitung des Sauerstoffs und damit die Ausbreitung der Verfärbung verhindern. Das in Bild 24-4 wiedergegebene Gefässverschluss-Profil stellt dies dar. Arten, welche sehr empfindlich auf Verletzungen reagieren, wie *Prunus* spp. oder *Juglans regia*, haben meistens viele verfärbte Zonen. Diese beiden Holzarten bilden ein obligatorisches Farbkernholz, das aber vielfach überlagert wird durch Verfärbungen, die durch Verletzungen entstanden sind. Im Gegensatz zur gesteuerten (obligatorischen) Farbkernholzbildung, welche regelmässig verläuft (meistens jedes Jahr ein Jahrring), entsteht der durch Verletzungen hervorgerufene (fakultative) Farbkern schubweise (mehrere Jahrringe in einem Jahr).

Zusammengefasst gibt es also Arten, bei welchen die Verfärbung nur durch Verletzungen hervorgerufen wird, und Arten, bei welchen die Verfärbung auch ohne Verletzung stattfindet und von den Pflanzen (hormonal?) gesteuert wird (R. K. Bamber, 1975). Die verfärbten Holzteile im Innern, welche gesteuert hervorgerufen werden, sind dauerhafter gegen Pilz- oder Insektenbefall als das nicht verfärbte Splintholz. Die erhöhte Dauerhaftigkeit wird durch die Umwandlung von Inhaltstoffen erreicht. Es findet nicht nur eine Umwandlung bereits anwesender Inhaltstoffe statt, sondern es werden auch Stoffe durch die Markstrahlen in zentripetaler Richtung transportiert. Bedingt durch diese Stoffwechselvorgänge weisen verfärbte Holzteile, mit Ausnahme der juvenilen Bereiche rund um die Markröhre, eine höhere Raumdichte auf als das Splintholz.

Als Folge des hydrophoben Charakters der Inhaltstoffe sind diese verfärbten Holzteile dimensionsstabiler als das Splintholz. Weil die Verfärbung in zentrifugaler Richtung in regelmässigen Zeitabständen fortschreitet (meistens ein Jahrring pro Jahr), ist die Farbe regelmässig verteilt. Die durch Verletzungen hervorgerufenen, verfärbten Holzteile sind in unregelmässigen Zeitabständen entstanden, wobei sich meistens mehrere Jahrringe gleichzeitig verfärbt haben. Dies ist meistens sichtbar am zonierten Erscheinungsbild dieser Bereiche, welches durch die verschiedenen Ereignisse entstanden ist. Farbunterschiede sind der Grund für das zonige Aussehen des Holzes.

Das Stammholz von älteren Bäumen ist in Splintholz (mit lebenden Parenchymzellen) und Kernholz (nur tote Zellen) zu unterteilen. Das Vorkommen und die Verteilung von Gefässverschlüssen im Holz zeigen, dass Kernholz drei verschiedene Entstehungsursachen haben kann:

1. Absterben der stamminneren Parenchymzellen durch Energie-, Wasser- oder Mineralienmangel, wobei auch die Alterung der Parenchymzellen eine Rolle spielt.
2. Absterben der stamminneren Parenchymzellen durch Energie-, Wasser- oder Mineralienmangel oder durch Alterung der Parenchymzellen mit nachfolgendem Sauerstoffeintritt und/oder Pathogeneintritt durch Verletzung.
3. Gesteuertes (aktives) Abtöten von Parenchymzellen.

Abgesehen von der Kernbildung durch äussere Einflüsse (Sauerstoff und/oder Mikroorganismen, welche durch eine Verletzung in den Baumkörper gelangen), gibt es zwei Arten von «normaler» Kernbildung (Bild 25): die passive (visuell meist hellerer Kern) und die aktive oder gesteuerte (visuell dunkler Kern, wegen der Anreicherung von pigmentierten Stoffen).

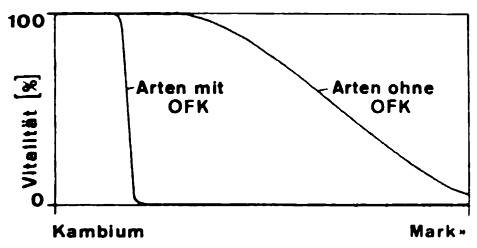


Bild 25 Verlauf der Vitalität der Parenchymzellen in Arten, welche obligatorisches Farbkernholz (OFK) bilden, und Arten, welche dies nicht tun, vom Kambium zum Mark.

Fig. 25 The vitality of parenchyma cells in species with and in species without obligatory coloured heartwood (OFK) from the cambium to the pith.

Fazit: Der Begriff «Kernholz» ist für die von äusseren Holzteilen abweichenden, inneren Holzpartien eines Baumes weitgehend eingebürgert und sollte darum als Gesamtbegriff erhalten bleiben. Dieses Kernholz sollte aber aus praktischen und wissenschaftlichen Gründen unterteilt werden. Das unter äusseren Einflüssen entstandene Kernholz setzt immer eine Verletzung voraus und kann als «fakultatives Farbkernholz» definiert werden. Das gesteuerte oder aktiv gebildete und immer dauerhaftere Kernholz kann als «obligatorisches Farbkernholz» und das passiv entstandene, meist hellfarbige, als «helles Kernholz» bezeichnet werden. Die sich hierdurch ergebende Einteilung wird in Tabelle 4 wiedergegeben. Tabelle 5 gibt eine Einteilung der baumartigen Gattungen nach Gefässverschluss- und Kernholztypus.

Tabelle 4 Einteilung von Splintholz und Kernholz.

Table 4 Classification of sapwood and heartwood. Splintholz = sapwood; Kernholz = heartwood; Helles Kernholz = bright heartwood; obligatorisches Farbkernholz = obligatory coloured heartwood; fakultatives Farbkernholz = facultatively coloured heartwood.

SPLINTHOLZ teilweise lebende Zellen	KERNHOLZ nur tote Zellen		
	meistens trockener als Splintholz, nicht oder nur wenig verfärbt und nicht dauerhafter	meistens trockener als Splintholz, deutlich verfärbt und dauerhafter	Zusammenhang mit Wunde und/ oder Pathogen, meist verfärbt und meist nicht dauerhafter
	HELLES KERNHOLZ	OBLIGATORISCHES FARBKERNHOLZ	FAKULTATIVES FARBKERNHOLZ (Falschkern) (Nasskern) (Farbkern) (Rotkern) (Braunkern) (Spritzkern) (Mosaikkern) (Zonenkern) (Strahlenkern) (Frostkern) (Schutzkern)

4.2 Gefässverschlüsse und embolierte Gefässe

Damit eine Holzpflanze eine Trockenperiode, d.h. eine Periode, in der die Pflanzenwurzeln kein Wasser aufnehmen können, überleben kann, stehen ihr folgende Mechanismen zur Verfügung, um diese Zeit so gut wie möglich zu überstehen (M. Büsgen, 1917; M.H. Zimmermann und J.A. Milburne, 1982; M.H. Zimmermann, 1983):
- Verminderte Transpiration
- Abnahme des Gefässdurchmessers
- Abgabe eines Teiles des Parenchymzellenwassers
- Entwässern der älteren Jahrringe
- Entwässern der wasserleitenden Gefässe
- Welken und Vertrocknen der Blätter

Diese Mechanismen stehen der Pflanze ungefähr in der angegebenen Reihenfolge zur Verfügung. Die Regulierung geschieht über physikalische Widerstände: Wenn eine Pflanze kein Wasser aus dem Boden aufnehmen kann, vermindert

Tabelle 5 Einteilung der baumartigen Gattungen nach Gefässverschluss- und Kernholztypus. HKH = helles Kernholz, OFK = obligatorisches Farbkernholz, MP = makropore Gefässe. *Ailanthus* ist aufgenommen als Beispiel einer Holzart mit makroporen Gefässen und gummiartigen Gefässverschlüssen. Die Gefässverschlüsse von *Fraxinus*, die Eschenthyllen, sind nicht eindeutig Thyllen oder gummiartig.

Table 5 Classification of the tree genera based on vessel-occlusion type and heartwood type. HKH = bright heartwood, OFK = obligatory coloured heartwood, MP = macroporous vessels, *Ailanthus* is mentioned as an example of a species with macroporous vessels (ringporous) and gum deposition as vessel occlusion. The vessel occlusions in *Fraxinus* are not clear tyloses or gum.

KERNHOLZ-TYPUS / GEFÄSS-VERSCHLUSS	HKH	HKH MP	OFK	OFK MP
THYLLEN	Carpinus Corylus Fagus Ligustrum Magnolia Ostrya Platanus Populus Salix	(Fraxinus)	Sambucus	Castanea Juglans Quercus Robinia Ulmus Vitis
GUMMI	Acer Aesculus Alnus Amelanchier Betula Buxus Clematis Crataegus Cydonia Ilex Tilia Viburnum	Ailanthus (Fraxinus)	Laburnum Malus Prunus Sorbus	

sie ihre Transpiration durch das Schliessen der Stomata. Hält der Wasserstress längere Zeit an, genügt dies nicht mehr, und der ansteigende negative Druck in den Gefässen bewirkt, dass deren Durchmesser abnimmt und auf diese Weise wieder Wasser zur Verfügung steht. Hält der Wasserstress noch weiter an, dann entleeren sich die Gefässe der älteren Jahrringe (F. M. Haines, 1935; K. N. H. Greenidge, 1958; M. H. Zimmermann und J. A. Milburne, 1982). Die älteren Jahrringe (d. h. das nicht wasserleitende Splintholz) dienen bei verschiedenen Pflanzen als Wasserspeicher (J. Böhm, 1867; E. Praël, 1888; G. Klein, 1923; R. Trendelenburg, 1955). Gas dringt in die Gefässe ein, wobei sie vom Wasser entleert werden. Nach der Theorie von M. H. Zimmermann (1983; siehe auch H. Holle, 1915) besitzen die Gefässwände Poren, welche eine bestimmte Grösse haben, «designed leaks», durch welche sie nur bei einem bestimmten negativen Druck Gas ins Gefäss eindringen lassen. M. H. Zimmermann vermutet, dass diese Poren sich beim Älterwerden der Gefässe vergrössern, wodurch diese sich leichter entleeren lassen als die jüngeren. Neben dieser Zunahme der Gefässwandporengrösse von jüngeren zu älteren Gefässen gibt es auch eine Zunahme dieser Poren von kleineren zu grösseren Gefässen. Dies könnte ein

Erklärung für die Verthyllung der Frühholzgefässe im Splintholz von ringporigen Holzarten sein: Die grossen Frühholzgefässe sind durch ihre grösseren Wandporen empfindlicher für Embolien als die kleineren Spätholzgefässe. Nach der «designed leaks»-Theorie entleeren sich die makroporen Gefässe sehr leicht bei Wasserstress (siehe auch B. Huber, 1953), und die Kontaktzellen reagieren darauf, indem sie anfangen, Thyllen zu bilden. Als Beispiel dafür können *Quercus*, *Fraxinus* und *Robinia* (T. Nobuchi et al., 1984) genannt werden (Bild 24, Beispiel 1). G. Klein (1923) berichtet, dass auf durchschnittlich feuchtem Boden die Thyllen bei *Robinia* sich erst im Verlauf des zweiten Jahres bilden, auf feuchten Standorten dagegen erst im dritten Jahr. Nach M. Fujita et al. (1978) erscheinen bei *Robinia* die Thyllen in trockenen Jahren früher als normal. Auch bei anderen Holzarten, z. B. *Salix* und *Populus*, kommt es vor, dass auch ohne Verletzung einzelne Gefässe verschlossen werden, was vermutlich auf den gleichen Vorgang zurückzuführen ist. E. Gerry (1914) behauptete, dass Holzarten, welche Gefässverschlüsse im Kernholz besitzen, auch immer Gefässverschlüsse im Splintholz aufweisen; dies wurde von M. Ito und T. Kishima (1951) bezweifelt und konnte mit der vorliegenden Arbeit (Bild 24, Beispiel 2) ebenfalls widerlegt werden.

Dass man in Splintholzgefässen vielfach Thyllen verschiedener Entwicklungsstadien im gleichen Gefäss findet, ist darauf zurückzuführen, dass Gefässe während kurzer Zeit mit Gas gefüllt waren, wodurch sich die Gefässverschlussbildung in Gang gesetzt hat; diese wurde aber wieder unterbrochen, weil sich die Gefässe später wieder mit Wasser füllten (M. H. Zimmermann, 1983).

Dass Gefässverschlüsse im allgemeinen im Wurzelholz viel weniger oder gar nicht vorkommen, hängt möglicherweise mit dem viel höheren Strömungswiderstand der Wurzelholzgefässe im Vergleich zu den Gefässen des Stammholzes (C. M. Stewart, 1967) zusammen. Dabei werden nämlich bei hohen negativen Drücken die Stammgefässe früher als die Wurzelgefässe entleert, diese bleiben wassergefüllt und es entstehen keine Gefässverschlüsse.

4.3 Gefässverschlüsse und Verletzungen

Bei einigen Baumarten verfärbt sich das zentrale Holz des Stammes, wenn durch eine Verletzung die Aussenluft direkt ins Holzinnere eindringen kann. Diese Verfärbung geschieht durch Oxidation von Phenolen in den Parenchymzellen (F. Kollmann, 1941; H. H. Bosshard, 1953; T. Higuchi et al., 1967). Eine Baumart, bei welcher dies gut und regelmässig zu beobachten ist, ist die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). Dieser verfärbte Teil wird «Rotkern» genannt, entsprechend der rötlichen Farbe des Holzes (J. Paclt, 1953, 1954). Dieses rotfarbige Holz kann sehr unterschiedlich verthyllt sein, vielfach aber ist es frei, oder fast frei, von Thyllen. Nur in einem schmalen Streifen an der Grenze zwischen rotfarbigem Holz und dem nach aussen gelegenen hellfarbigen Holz sind alle Gefässe durch Thyllen und Gummi verschlossen (Bild 24, Beispiel 4). Dieser Aufbau entsteht dadurch, dass in einem älteren Buchenstamm, d. h. einem Stamm, in dem die inneren Parenchymzellen nicht mehr in der Lage sind,

Gefässverschlüsse zu bilden, durch eine Verletzung (Astbruch, Wurzelverletzung usw.) Sauerstoff ins Holzinnere eindringen kann und dadurch die Verfärbung ausgelöst wird. Sauerstoff kann nur ins Stamminnere eindringen, wenn das Holz trocken genug ist. Der Holzfeuchtigkeitsgehalt muss nach H. Zycha (1948) bei *Fagus sylvatica* unter 64 % liegen. Bei diesem Wert sind nur noch die Zellwände und die Parenchymzellen, inklusive Markstrahlzellen, wassergesättigt; die Gefässe und restlichen Zellarten sind wasserfrei, so dass der Sauerstoff in ihnen Platz greifen kann. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Grenze des Holzfeuchtigkeitsgehaltes variieren kann, abhängig von verschiedenen Gewebeanteilen. Die Verfärbung breitet sich in longitudinaler Richtung aus. Die Aussengrenze der verfärbten Zone wird von vitalen, reaktionsfähigen Parenchymzellen bestimmt, welche anfangen, in den Gefässen Gefässverschlüsse zu bilden, und dadurch das weitere Vordringen des Sauerstoffes stoppen. Ein anderes Beispiel eines solchen Baumes ist *Fraxinus excelsior* (H. H. Bosshard, 1955; C. M. Moeller und K. Gram, 1959; M. Eggenberger, 1981). Findet die Verfärbung unter Einfluss von Sauerstoff statt, dann bleiben die, die Verfärbung verursachenden Polyphenole (Tannine) im Zellumen. Diese Polyphenolmoleküle sind zu gross, um die Parenchymzelle verlassen zu können oder die Zellwand zu inkrustieren (A. Frey-Wyssling und H. H. Bosshard, 1959; H. H. Bosshard, 1967, 1968).

Neben dem Sauerstoff sind auch Mikroorganismen in der Lage, Holzverfärbungen hervorzurufen. Geraten Mikroorganismen ins lebende Holz, dann verfärbt sich das Holz und die Gefässe verschliessen sich. Das fakultative Kernholz von *Populus*- und *Salix*-Arten kann auf diese Weise entstehen (V. H. Clausen und F. H. Kaufert, 1952).

In Arten, welche lebende Fasern besitzen, wie *Acer* spp., enthalten diese auch manchmal gummiartige Einlagerungen, ähnlich wie die Parenchymzellen. Nach J. R. Barnett (1982) haben beide die gleiche Funktion und sind, evolutionär gesehen, nahe verwandt.

4.4 Die Häufigkeit des Gefässverschluss-Vorkommens

Die Gefässverschluss-Häufigkeit hängt u. a. von der Häufigkeit von Gefäss-Parenchym-Tüpfeln ab, welche in der Lage sind, an der Gefässverschluss-Bildung teilzunehmen. Diese hängt ab von der Menge des an den Gefässen anliegenden Markstrahlparenchyms und des paratrachealen Parenchyms, von der Anzahl der GPT pro Parenchymzelle, von der GPT-Form, von der Gefässwanddicke und von der Vitalität der Parenchymzellen. Der Unterschied zwischen Weisseichen (viel Thyllen) und Roteichen (wenig Thyllen) ist damit nämlich erklärbar: Bei den Roteichen werden die Gefässe von viel weniger Markstrahlen berührt und die Spätholzgefässe sind dickwandiger als bei den Weisseichen. Nach E. A. Wheeler und R. J. Thomas (1981) haben Roteichen weniger Kontaktstellen zwischen Frühholzgefässen und Markstrahlen (9 %) als Weisseichen (16 %). Auch haben Roteichen (23 %), im Vergleich zu Weiss-

eichen (44 %), weniger Kontaktstellen zwischen Frühholzgefässen und Markstrahlen beidseitig der Gefässe (d. h. dass im Querschnitt gesehen, das Gefäss zwischen zwei Markstrahlen eingeschlossen ist).

Mit Hilfe von G. Haberlandts (1914) Befunden lässt sich erklären, weshalb die Thyllen bei Verletzungen in den nahe am Kambium gelegenen Gefässen schneller, in grösseren Mengen und auch über grössere Distanzen gebildet werden: Er vermutet, dass Kambium und Phloem einen Reizstoff (Hormon) bilden, welcher das Zellwachstum beeinflusst. Auch ist es möglich, dass diese äusseren Parenchymzellen vitaler sind als die im Innern gelegenen oder dass der höhere negative Druck in den äusseren Gefässen diesen Unterschied hervorruft.

5 Ontogenie und Funktion

Die bisherigen Theorien über die Auslösung der Thyllenbildung umfassen Wasserverlust, Sauerstoff, Störung des Wassertransportes, Gewebespannung, Wundreiz, Infektion und Hormone. Der Wasserverlust an sich kann kein auslösender Faktor sein, denn auch wenn kein freies Wasser mehr im Gefäss ist, ist die relative Luftfeuchtigkeit immer noch maximal, so dass die Parenchymzellen nicht austrocknen können. Der Wasserverlust kann aber trotzdem Folgen haben für die Sauerstoff-Konzentration und die Gewebespannung. Als weitere Gefässverschluss-Auslöser sind Bakterien und Pilze (E. Küster, 1903; D. M. Elgersma und H. J. Miller, 1977; G. B. Ouellette, 1978, 1980; K. J. M. Bonsen et al., 1985) und auch pflanzeneigene Hormone (R. K. Bamber, 1975, 1976) genügend bekannt.

Beobachten wir einmal die Gewebeverwundung: Wenn in unverholztem pflanzlichem Gewebe eine Zelle ausfällt (z. B. bei Verletzung), dann füllen die Nachbarzellen diesen Raum wieder auf. Was dieses Zellwachstum stimuliert, ist nicht genau bekannt. Bekannte Theorien basieren auf Gewebespannung, Sauerstoffzufuhr und Wundreiz (R. Lohse, 1924; F. Brieger, 1925). Die Gewebespannungs-Theorie geht davon aus, dass im Prinzip jede unverholzte Zelle auswachsen will, jedoch von ihren Nachbarzellen daran gehindert wird. Fällt eine Nachbarzelle aus, dann ist diese Zelle in der Lage auszuwachsen, bis sie gegen andere Zellen stösst.

Die Sauerstoff-Theorie geht davon aus, dass Zellen im gesunden Gewebe von einem niedrigen Sauerstoffgehalt umgeben sind. Wird das Gewebe verletzt, dann wird der Sauerstoffgehalt erhöht, wodurch die unverletzten Nachbarzellen zum Wachstum stimuliert werden.

Die Wundreiz-Theorie geht davon aus, dass eine verletzte Zelle bestimmte Stoffe abgibt oder das elektrische Potential der Nachbarzellen beeinflusst (Na-K-Verhältnis), wodurch die Nachbarzellen zum Wachstum stimuliert werden. Dieses Auffüllen eines plötzlich freiwerdenden Raumes sehen wir auch bei der Kallusbildung, wo sich die unverletzten Nachbarzellen vergrössern und ɔäter teilen.

Bei kleinen, nur wenig verholzten Pflanzen mit Gefässen (z. B. Farne und angiosperme Kräuter) dehnt sich die Membran zwischen Gefäss und Parenchymzelle ins Gefässlumen hinein, wenn sich das Gefäss mit Luft füllt. Dies ist bei den sogenannten Spiralgefässen des primären Xylems deutlich zu beobachten (Bild 26). Diese Ausdehnung der Membran kann verglichen werden mit dem Auswachsen von Nachbarzellen beim Verschwinden einer Zelle in einem Pflanzengewebe. Weil das Wasser aus dem Gefäss verschwindet, fällt der Gegendruck aus (Gewebespannungs-Theorie). Auch ist es möglich, dass durch den Wasserverlust die Sauerstoffkonzentration im Gefäss erhöht wird (Sauerstoff-Theorie). Die Wundreiz-Theorie kann hier keine Rolle spielen. Inkubationsversuche in einer sauerstofflosen Atmosphäre zeigten, dass die Thyllenbildung auch ohne Sauerstoff ausgelöst werden kann. Dies stimmt mit den Ergebnissen von G. Klein (1923) überein.

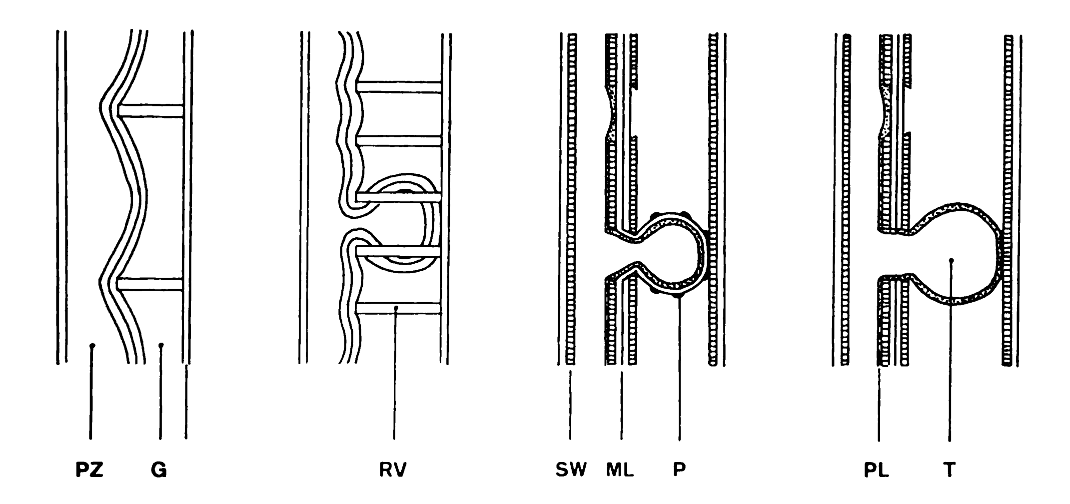


Bild 26 Mögliche Entwicklung der Thyllenbildung, wiedergegeben in vier Stadien (die erklärenden Begriffe sind nicht für jedes Stadium wiederholt). PZ = Parenchymzelle, G = Gefäss, RV = ringförmige Verdickung, P = Pektintropfen, SS = Schutzschicht, ML = Mittellamelle, PW = Primärwand, SW = Sekundärwand, T = Thylle.

Fig. 26 Possible evolutionary sequence of tylosis formation. The development of gum deposits and its relation with tylosis formation is not involved. PZ = parenchyma cell, G = vessel, RV = ring thickening, P = pektin droplet, SS = protective layer, ML = middle lamella, PW = primary wall, SW = secondary wall, T = tylosis.

Durch die Transpiration entsteht ein negativer Druck in den Gefässen. Um diesem negativen Druck widerstehen zu können, müssen die an den Gefässen anliegenden Parenchymzellen einen höheren Druck aufrechterhalten. Dieser osmotische Druck in den an die Gefässe grenzenden Parenchymzellen ist sehr hoch: 10–17 atm in den Markstrahlzellen von *Fagus sylvatica* gegenüber ungefähr 1 atm im Gefässwasser (L. Jurásek, 1960). Fällt dieser negative Druck weg oder wird er durch die Aktivität der Wurzeln sogar positiv, dann exportiert die Parenchymzelle Zucker ins Gefäss zur Regulierung des osmotischen Druckes (O. Gertz, 1916, 1919; J.J. Sauter, 1972; E.M. Sharon, 1972; J.J. Sauter et al., 1973; S.C. Chafe, 1974). Ist aber kein Wasser mehr im Gefäss vorhanden, dann kann kein Zucker mehr gelöst werden und der Turgor der Parenchymzelle nimmt zu. Durch diesen Turgor wird die Thyllenbildung erleichtert (R. Trendelenburg, 1955). Es findet eine Unterbrechung der Regulierung des osmotischen Druckes statt. Die Folge davon ist eine Ausdehnung der Parenchymzelle wo immer möglich, in diesem Fall durch den Tüpfel. Eine Bestätigung dieses Vorganges ergeben die Untersuchungen von N. Shibata et al. (1981), woraus hervorgeht, dass die wasserleitenden Gefässe viel schneller verschlossen werden als jene, die Wasser speichern. Dies kann, neben einem Unterschied in der Zellaktivität, dadurch verursacht werden, dass die an den wasserleitenden Gefässen anliegenden Kontaktzellen ein viel höheres osmotisches Potential aufweisen als diejenigen der wasserspeichernden Gefässe und dass diese bedingt durch die Entwässerung der Gefässe einen viel höheren Turgor aufweisen. Aus Saftsteigeversuchen, ausgeführt von H. Winkler (1906) und G. Klein (1923), geht hervor, dass durch Druck eher Thyllenbildung entsteht als durch Saugwirkung, was ebenfalls mit dieser Theorie erklärt werden kann. Eigene Untersuchungen, wobei Astmaterial in Wasser verschiedener osmotischer Werte inkubiert wurde, zeigen, dass die Äste, welche in gesättigte Lösungen eingelegt wurden, am schnellsten und am häufigsten Thyllen bilden.

5.1 Eine mögliche Erklärung für das Entstehen und die Weiterentwicklung von Gefässverschlüssen in Pflanzen

Um das Entstehen der Gefässverschluss-Bildung verstehen zu können, müssen wir auf die Phylogenie der Pflanzen zurückblicken. Die ersten aufrecht wachsenden Landpflanzen bestanden nur aus lebenden Zellen. Bei einer Verletzung starben die verletzten Zellen ab, und die direkt an den verletzten Zellen anliegenden Zellen trockneten aus und bildeten dadurch eine Barriere für Wasser, Luft und Mikroorganismen. In diesen Pflanzen bleiben, solange die Pflanze lebt, alle Zellen am Leben, und dadurch ist jede Zelle in der Lage, auf äussere Einflüsse zu reagieren. Die Pflanzen sind auf diese Weise äusserst fein kompartimentiert.

Mit zunehmender Höhe der Pflanzen und der Zunahme der Transpiration entstanden Tracheiden und Gefässe. Ein Teil der Zellen war also nicht länger reaktionsfähig, und durch die Gliederung mehrerer Gefässzellen wird die oben beschriebene Kompartimentierung durchbrochen. Bei Tracheiden bleibt die

Kompartimentierung durch das Schliessen der Hoftüpfel wenigstens mechanisch erhalten. Mit dem Entstehen von Gefässen genügte die ausgetrocknete Zellschicht den Pflanzen nicht mehr, denn die Gefässe durchbrachen diese Schicht, und auch innerhalb des Baumkörpers wurde die vorher bestehende Kompartimentierung durchbrochen (A.L. Shigo und H.G. Marx, 1977; W. Merrill und A.L. Shigo, 1979). Die Lösung dieses Problems war das Verschliessen dieser Gefässe.

Die ersten Gefässpflanzen besassen Spiralgefässe oder Ringgefässe in ihrem primären Xylem. Zwischen zwei Spiralen besteht die Wand nur aus Mittellamelle und den beiden Primärwänden. Wenn diese nicht lignifiziert sind, kann sich diese Wand unter Einfluss des Turgors ins Gefäss hineinwölben und das Gefäss teilweise oder vollständig verschliessen (Bild 26).

Mit zunehmender Höhe der Pflanzen gewannen die Gefässe an Bedeutung: Sie wurden zahlreicher, länger oder hatten einen grösseren Durchmesser. Um die Festigkeit zu erhöhen, entstanden Pflanzen mit lignifizierten Zellwänden und der Stammdurchmesser nahm durch Dickenwachstum (sekundäres Xylem) zu; es entstanden Holzpflanzen. Auch die Gefässwände verholzten zunehmend und die Räume zwischen den Spiralen schlossen sich mehr und mehr (Sekundärwand), bis nur noch die sogenannten Tüpfel ohne Sekundärwand und unlignifiziert blieben. Weil es für diese Pflanzen wichtig war, ihre Gefässe verschliessen zu können, blieben die MTD gross genug, um Thyllenbildung zu ermöglichen. Dies sehen wir z. B. bei *Magnolia* und *Liriodendron*.

Die Entstehung der Sekundärwände und die Lignifizierung der Wände bis auf den GPT haben eine Reduzierung der Oberfläche, welche den Stoffaustausch reguliert, zur Folge. Um einen schnellen Austausch aufrechtzuerhalten, entstand in den an den Gefässen anliegenden Parenchymzellen eine zusätzliche Wandschicht, die sogenannte Schutzschicht. Dass eine Vergrösserung der inneren Oberfläche den Stoffaustausch steigert, hat Castro (1985) gezeigt. Parenchymzellen mit einer solchen Schicht zum schnelleren Stoffaustausch sind eine allgemein vorkommende Erscheinung bei Pflanzen (F.B.P. Wooding und D.H. Northcote, 1965; B.E.S. Gunning und J.S. Pate, 1969) und können mit den sogenannten «Transfer Cells» (Y. Czaninski, 1977) verglichen werden. Bei den Holzpflanzen dient diese Schicht nicht nur dem Stoffaustausch, sondern auch als Stoffspeicher, welcher ein schnelleres Thyllenwachstum ermöglicht. T.P. Obrien (1970) diskutiert eine mögliche Rolle dieser Schicht beim Schutz der Parenchymzellen, wenn bei der Gefässentstehung Zellwandmaterial hydrolisiert wird. Die Schutzschicht spielt in der Evolution der Thyllenbildung eine immer wichtigere Rolle (Bild 26):

- Bei den phylogenetisch älteren Pflanzen wächst nur die Tüpfelmembran ins Gefäss.
- Bei den evolutionär jüngeren Pflanzen wachsen Schutzschicht und Tüpfelmembran ins Gefäss.
- Nach einem weiteren evolutionären Schritt wächst nach Hydrolysierung eines Teiles der Tüpfelmembran (d. h. der Gefässteil des Tüpfels, die Gefäss-

primärwand) nur noch die Schutzschicht mit der Parenchymprimärwand und der Mittellamelle ins Gefäss hinein.

- Aus den Untersuchungen von S. C. Chafe und G. Chauret (1974) geht hervor, dass es sogar möglich ist, dass die Tüpfelmembran überhaupt nicht mehr mitwächst, d. h. dass nur die Schutzschicht in das Gefäss hineinwächst. Der Schutzschichtaufbau gibt den Eindruck, dass die Schutzschicht aus einer kompletten Zellwand, mit einer pektinreichen äusseren Schicht (vgl. Mittellamelle), einer Primärwand und einer inneren Sekundärwand, besteht.

Häufig befinden sich Strukturen an der Aussenseite der Thylle, welche als sogenannte Warzen bekannt sind. Diese Warzen sind vergleichbar mit den von S. Carlquist (1956), D. J. Carr et al. (1980), E. Ott (1982) und U. M. Bangerter (1984) beschriebenen und diskutierten Strukturen. E. Ott (1982) vermutet, dass es sich hierbei um Reste (Pektintropfen) der Mittellamelle oder der äusseren Schutzschicht handelt, welche sich unter der Wirkung der Oberflächenspannung zu inselähnlichen Tropfen zusammengezogen haben. Nach R. A. Cockrell (1935) und auch I. Sachs et al. (1970) färbt sich die gemeinsame Wand zweier zusammengewachsener Thyllen wie jene von zwei normalen Holzzellen. Die Schutzschicht ist eine Schicht, welche darauf vorbereitet ist, als Thylle auswachsen zu können.

Die Thyllen werden meistens von Gummi begleitet, welcher den Verschluss vervollständigt. Dieser Gummi wird möglicherweise durch die Thyllen (als Teile von Parenchymzellen) selber gebildet. Durch die Gummiproduktion der Parenchymzellen hat die Pflanze die Möglichkeit, ihre Gefässe nur noch mit Gummi zu verstopfen, d. h. ohne Thyllenbildung. Die Gefäss-Parenchym-Tüpfel werden im Verlauf der Entwicklung so klein, dass keine Thyllenbildung mehr möglich ist, wie z. B. bei *Betula*. Die Gummi-Ablagerung hat dort die Thyllenbildung ersetzt. Ob die Verkleinerung der GPT der Pflanze einen Vorteil bietet, ist nicht bekannt. Man kann über erhöhte Festigkeit des Holzes oder weitere Trennung des Wasserleitsystemes vom restlichen Holz (H. J. Braun, 1983, 1984) spekulieren. Auch ist es möglich, dass mit der Abnahme des Durchmessers der Intervaskulartüpfel auch die der GPT abnahm (W. L. Stern, 1978). Tatsache ist aber ein evolutionärer Trend in Richtung Verholzung der Gefässwände, wobei die Verkleinerung der Gefässwandöffnungen nur ein Teilprozess innerhalb der Evolution des Holzes ist (I. W. Bailey 1944, 1953; S. Carlquist, 1975; J. R. Barnett, 1982).

Ist eine noch grössere Wasserleitfähigkeit erforderlich, wie z. B. für Bäume im Mittelmeer-Raum (kurze Regenperiode, hohe momentane Transportfähigkeit, B. Huber und C. Rouschal, 1954) oder für Bäume im tropischen Regenwald (kurze optimale Transpirationsdauer), dann ist dies am einfachsten durch eine weitere Vergrösserung der Gefässe zu realisieren (das Wasserleitvermögen eines Gefässes variiert mit der vierten Potenz seines Radius). Die Folge dieser Gefässvergrösserung sind Holzarten mit den sogannnten makroporen Gefässen. Diese Makroporie kann auf einen Teil der Gefässe beschränkt (bei ringporigen Hölzern) oder vollständig sein (bei vielen tropischen Hölzern). Dass nicht in

allen Holzarten makropore Gefässe vorkommen, hängt damit zusammen, dass die Nachteile (erhöhte Emboliegefahr, schnellere Ausbreitung von Mikroorganismen und Giftstoffen) den Vorteil der besseren Wasserführung überwiegen. Da für den Verschluss von makroporen Gefässen grosse Mengen von Gummi einzubringen sind, ist Thyllenbildung aus energetischer Sicht denkbar günstiger als die Gummiproduktion, davon ausgehend, dass die Thylle als Hohlkörper weniger Material als die massiven Gummi-Einlagerungen braucht. Bei den makroporen Holzarten werden die Gefässe dann auch durch Thyllen verschlossen. Eine der Ausnahmen ist z. B. *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, eine ringporige Holzart mit teilweise makroporen Gefässen, welche mittels Gummi verstopft werden. Möglicherweise ist das für diese wärmeliebende Baumart energetisch machbar. Holzarten mit grossen Gefässen sind also wieder auf die Thyllenbildung angewiesen, es sind (phylogenetisch gesehen) sekundär thyllenbildende Holzarten. Dies im Gegensatz zu den primär thyllenbildenden Holzarten wie z. B. *Magnolia* und *Liriodendron* (Bild 27).

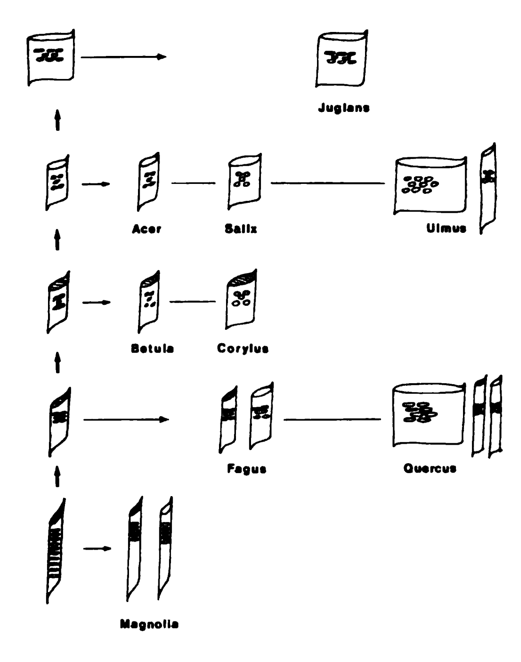


Bild 27 Mögliche Entwicklung der Gefässelemente und ihr Vorkommen in einigen Holzartentypen. Vertikal: Wiedergabe der Entwicklung. Horizontal: von links nach rechts Zunahme der Gefässdurchmesser (MGD). Der Acer-Typus und der Betula-Typus bilden nur Gummi, die restlichen Typen sind in der Lage, Thyllen zu bilden.

Fig. 27 Possible evolutionary sequence of the vessel elements and their presence in some wood species. Vertical: development. Horizontal: from the left to the right increase of the vessel diameter (MGD). The Acer-type and the Betula-type only produce gum, the other types are able to develop tyloses.

5.2 Beteiligung der Zelltypen an der Gefässverschlussbildung und Unterschiede in der Gefässverschlussgrösse

Die in dieser Studie beobachteten Gefässverschlüsse entstanden meistens aus Markstrahlzellen, gelegentlich aber auch aus Längsparenchymzellenden, die den Gefässen anliegen. Dies stimmt überein mit E. Gerry (1914), K. Ermich (1964) und Z. Kóràn und K.C. Yang (1972) und steht im Gegensatz zu M. M. Chattaway (1949), welche nur das Entstehen aus Markstrahlzellen beobachtet hat. Dass sich die Markstrahlzellen öfters an der Gefässverschluss-Bildung beteiligen, hängt möglicherweise damit zusammen, dass die Markstrahlen bei vielen Arten ein grösseres Volumen im Holz einnehmen als das Längsparenchym und dass sie die Haupttransportwege für Zucker (beeinflusst Osmose) und Hormone (möglicher Auslöser der Gefässverschluss-Bildung) darstellen.

Dass man regelmässig Thyllen, die in einem Knospenstadium steckengeblieben sind, in einem Gefäss beobachten kann oder dass man in einem Gefäss Thyllen von verschiedenen Grössen antrifft, liegt darin, dass embolierte Gefässe wieder mit Wasser aufgefüllt wurden, wodurch das Thyllenwachstum aufhörte.

5.3 Die Geschwindigkeit der Gefässverschluss-Bildung

Die Bilder 28 und 29 sind ein Versuch, etwas über den Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit der Gefässverschluss-Bildung auszusagen. Im Prinzip sind die wiedergegebenen Daten nur für eine einzelne Kontaktzelle gültig. Das heisst, dass diese einzelne Kontaktzelle zur Gefässverschluss-Bildung übergeht, wenn alle Voraussetzungen und ein auslösender Faktor vorhanden sind. Es ist aber viel schwieriger vorauszusagen, wie die Gefässverschluss-Bildung in

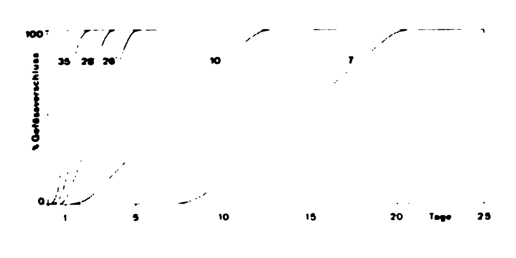


Bild 28 Geschwindigkeit der Gefässverschlussbildung in Abhängigkeit von der Temperatur (°C), ausgedrückt in Prozent des maximalen Gefässverschlusses.

Fig. 28 Velocity of the vessel-occlusion development in relation to temperature (°C), given as a percentage of maximum vessel occlusion.

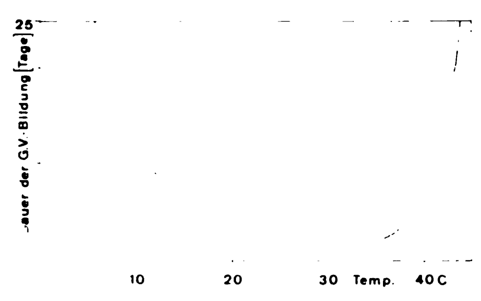


Bild 29 Dauer der Gefässverschlussbildung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Fig. 29 Duration of the vessel occlusion process in relation to temperature.

einem gefällten Baumstamm oder in einem grösseren Stück Holz vor sich geht. Dazu ist es notwendig, die verschiedenen Verteilungen von Stärke, Holzfeuchtigkeit, Temperatur und der Vitalität der Kontaktzellen im Baum zu kennen und die Änderung dieser Verteilungen innerhalb des Prozesses zu erfassen. Daneben müssen auch die Sauerstoff-Spannung, Mikroorganismen und genetische Unterschiede berücksichtigt werden. Anders gesagt, es müssen alle relevanten Ausgangs-Situationen bekannt sein, und es müssen alle Umgebungseinflüsse (hauptsächlich Witterung) während des ganzen Vorganges einbezogen werden.

5.4 Die Funktion der Gefässverschlüsse

In der Literatur wird der Schutz gegen aussen als wichtigste Funktion der Gefässverschlüsse genannt. Neben diesem sollten für Thyllen auch Stärkespeicherung, Wasserspeicherung, Stoffleitung und, im Falle von Steinthyllen, Erhöhung der Holzfestigkeit als Funktionen in Frage kommen. Dem Gummi kommt nur die Funktion des Schutzes gegen aussen zu.

Wie aus dem Kapitel über die Evolution der Gefässverschluss-Bildung hervorgeht, war die Entwicklung der Gefässverschlüsse primär darauf gerichtet, verletzte Xylemteile gegen aussen zu schützen. Um dieser Aufgabe noch besser gewachsen zu sein, entstand neben der Lignifizierung und Phenol-Einlagerung in den Thyllenwänden (Phenole, insbesondere Polyphenole beeinträchtigen das Wachstum von Mikroorganismen; O. Bayer, 1989) die Gummiproduktion durch die Thyllen selber und die Verkorkung der Thyllen (R. B. Pearce und P. J. Holloway, 1984; N. Parameswaran et al., 1985). In anderen Pflanzen wurde das Verschliessen der Gefässe ausschliesslich von Gummi übernommen. Im sekundären Xylem machen die Gefässverschlüsse einen Teil des CODIT-Systems (Compartmentalisation of decay in trees, A. L. Shigo und H. G. Marx, 1977) aus.

Da Thyllen Teile von Parenchymzellen sind, ist es nicht aussergewöhnlich, dass sie auch in der Lage sind, Stärke zu speichern. Es ginge aber zu weit zu sagen, dass das Speichern von Stärke ihre Hauptfunktion wäre. Der Gedanke über die Einschaltung von Thyllen in die Stoffleitung ist als Erklärung für das Vorkommen von grösseren und kleineren Thyllen im gleichen Gefäss entstanden. Diese unterschiedliche Thyllengrösse muss aber eher als Folge des Entleerens und nachher wieder Auffüllens der Gefässe mit Wasser angesehen werden. Dass Thyllen, in der Form von Steinthyllen, zur Erhöhung der Festigkeit des Holzes beitragen, ist fraglich. Eher wahrscheinlich aber ist, dass sie dafür sorgen, dass die Gefässe nicht das schwächste Glied im Schutz gegen Mikroorganismen sind: Sie sind nur in sehr dauerhaften Holzarten angetroffen worden. Ob die Thyllen auch zur Wasserspeicherung dienen können, erfordert weitere Untersuchungen. Man könnte sich aber vorstellen, dass ringporige Holzarten, welche in ihrem Entstehungsgebiet in kurzer Zeit grosse Mengen Wasser aufnehmen und speichern müssen, ihre embolierten makroporen Frühholzgefässe der älteren Jahrringe mit Hilfe der dort vorhandenen Thyllen wieder für die

Wasserspeicherung benützen können. Das gleiche könnte der Fall bei den Eschenthyllen sein.

5.5 Thyllosoiden

Vielfach ist in der Literatur auf eine Analogie zwischen Thyllen und thyllenähnlichen Strukturen (Thyllosoiden) hingewiesen worden. Dies trifft, was die ursprünglichen Thyllen, d. h. Thyllen in Spiral- und Ringgefässen, angeht, sicher zu. Thyllen, welche in Tüpfelgefässen mit Hilfe einer Schutzschicht entstehen, sind nicht mehr mit den Thyllosoiden zu vergleichen. Sie sind vorprogrammiert, um als Gefässverschlüsse auszuwachsen, d. h. sie reagieren schneller und effizienter auf bestimmte Reize, als ihre Vorgänger oder als die Thyllosoiden.

Die in der gymnospermen Gattung *Pinus* vorkommenden Auswüchse der Markstrahlen sind als Thyllen anzusehen, denn sie wachsen in eine andere Zelle (Tracheide) hinein; dies geschieht im Gegensatz zu den Thyllosoiden, welche immer Interzellularräume ausfüllen. Diese Tatsache steht nicht in Übereinstimmung mit der von der IAWA (1964) gegebenen Definition (diese besagt, dass Thyllen Auswüchse in ein Gefäss sind); sollte bis zur nächsten Ausgabe des Glossarys geklärt werden.

6 Literatur

Bailey, I. W. (1944). The development of vessels in angiosperms and its significance in morphological research. American journal of botany, *31:* 421–428.

Bailey, I. W. (1953). Evolution of the tracheary tissue of land plants. American journal of botany. *40:* 4–8.

Bamber, R. K. (1975). Comparative studies of sapwood and heartwood. Ph. D. Thesis, Macquarie university, USA.

Bamber, R. K. (1976). Heartwood, its function and formation. Wood science and technology, *10:* 1–8.

Bangerter, U. M. (1984). Der Verschlussmechanismus von Längswunden am Stamm von *Larix decidua* Mill. and *Picea abies* (L.) Karst. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, *129:* 339–398.

Barnett, J. R. (1982). Plasmodesmata and pit development in secondary xylem elements. Planta, *155:* 251–260.

Bayer, O. (1989). Einflüsse verschiedener Polyphenole der Süsskirschrinde auf das Wachstum zweier Rindenpathogene in vitro. Gartenwissenschaft, *54:* 138–141.

Böhm, J. (1867). Über Funktion und Genesis der Zellen in den Gefässen des Holzes. Sitzungsberichte der matematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Abteilung 2, *55:* 861–866.

Bonsen, K. J. M. (1990). Gefässverschluss-Mechanismen in Laubbäumen. Dissertation ETH-Zürich, Nr. 9125, 192 pp.

Bonsen, K. J. M., Scheffer, R. J. und Elgersma, D. M. (1985). Barrier zone formation as a resistance mechanism of elms to Dutch elm disease. IAWA bulletin n.s., *6:* 71–77.

...ard, H. H. (1953). Der braune Kern der Esche. Holz als Roh- und Werkstoff, *11:* 349–353.

...ard, H. H. (1955). Zur Physiologie des Eschenbraunkerns. Schweizerische Zeitschrift für ...esen, *106:* 592–612.

Bosshard, H. H. (1965a). Mosaikfarbkernholz in *Fagus silvatica* L. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, *116:* 1–11.
Bosshard, H. H. (1965b). Aspects of the aging process in Cambium and xylem. Holzforschung, *19:* 65–69.
Bosshard, H. H. (1966a). Aspekte der Alterung in Waldbäumen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, *117:* 168–175.
Bosshard, H. H. (1966b). Notes on the biology of heartwood formation. IAWA bulletin *1:* 11–14.
Bosshard, H. H. (1967). Über die fakultative Farbkernbildung. Holz als Roh- und Werkstoff, *25:* 409–416.
Bosshard, H. H. (1968). On the formation of facultatively colored heartwood in *Beilschmiedia tawa*. Wood science and technology, *2:* 1–12.
Braun, H. J. (1983). Zur Dynamik des Wassertransportes in Bäumen. Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft, *96:* 29–47.
Braun, H. J. (1984). The significance of the accessory tissues of the hydrosystem for osmotic water shifting as a second principle of water ascent, with some thoughts concerning the coevolution of the trees. IAWA bulletin n. s., *5:* 275–294.
Brieger, F. (1925). Die Ätiologie der Thyllen. Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft, *43:* 443–449.
Büsgen, M. (1917). Bau und Leben unserer Waldbäume. Verlag von Gustav Fischer, Jena, 340 pp.
Carlquist, S. (1956). On the occurrence of intercellular pectic warts in *Compositae*. American journal of botany, *43:* 425–429.
Carlquist, S. (1975). Ecological strategies of xylem evolution. University of California press, Berkeley, 259 pp.
Carr, D. J., Oates, K. und Carr, S. G. M. (1980). Studies on intercellular pectic strands of leaf palisade parenchyma. Annals of botany, *45*: 403–413.
Castro, M. A. (1985). Structure of the vesselparenchyma pit membrane in some species of *Lauraceae*. IAWA bulletin n. s., *6:* 35–38.
Chafe, S. C. (1974). Cell wall formation and "protective layer" development in the xylem parenchyma of trembling aspen. Protoplasma, *80*: 335–354.
Chafe, S. C. und Chauret, G. (1974). Cell wall structure in the xylem parenchyma of trembling aspen. Protoplasma, *80:* 129–147.
Chattaway, M. M. (1949). The development of tyloses and secretion of gum in heartwood formation. Australian journal of scientific research, *2:* 227–240.
Clausen, V. H. und Kaufert, F. H. (1952). Occurrence and probable cause of heartwood degradation in commercial species of *Populus*. Journal of the forest products research society, *2:* 62–67.
Cockrell, R. A. (1935). Sclerosed tyloses of *Elateriospermum tapos* Bl. Papers of the Michigan academy of science, arts, and letters, *20:* 31–32.
Czaninski, Y. (1977). Vessel-associated cells. IAWA bulletin, *3:* 51–55.
Dimond, A. E. (1970). Biophysics and biochemistry of the vascular wilt syndrome. Annual review of phytopathology, *8:* 301–322.
Dujesiefken, D. (1989). Der Eichen-Mondring und seine Bedeutung für die Holzverwertung. Holz-Zentralblatt, *115:* 72–74.
Eggenberger, M. (1981). Zur Thyllenbildung in Esche (*Fraxinus excelsior* L.). Diplomarbeit der Abteilung Forstwirtschaft der ETH Zürich, 61 pp.
Elgersma, D. M. und Miller, H. J. (1977). Tylose formation in elms after inoculation with an aggressive or a non-aggressive strain of *Ophiostoma ulmi* or with a non-pathogen to elms. Netherlands journal of plant pathology, *83:* 241–243.
Ermich, K. (1964). The origin of tylose in trunks of growing oak trees (*Quercus robur* L.). Ekologia Polska, Ser. A., *12:* 505–527.
Forster, R. C. (1967). Fine structure of tyloses in three species of the *Myrtaceae*. Australian journal of botany, *15:* 25–34.
Frey-Wyssling, A. (1976). The plant cell wall. Gebrüder Bornträger, Berlin, 3rd edition.
Frey-Wyssling, A. und Bosshard, H. H. (1959). Cytology of the ray cells in sapwood and heartwood. Holzforschung, *13:* 129–137.

Fujita, M., Nakagawa, K., Mori, N. und Harada, H. (1978). The season of tylosis development and changes in parenchyma cell structure in *Robinia pseudoacacia* L. Bulletin of the Kyoto university of forests, *50:* 183–190.
Gerry, E. (1914). Tyloses: their occurrence and practical significance in some American woods. Journal of agricultural research, *1:* 445–469.
Gertz, O. (1916). Untersuchungen über septierte Thyllen nebst andern Beiträgen zu einer Monographie der Thyllenfrage. Lunds universitets Arsskrift n. s. Avd. 2, *12*: 1–45.
Gertz, O. (1919). Über einen neuen Typus stomatärer Thyllenbildung nebst Beobachtungen zur pathologischen Anatomie des Spaltöffnungsapparates bei *Paeonia paradoxa*. Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft, *37:* 237–244.
Greenidge, K. N. H. (1958). Rates and patterns of moisture movement in trees. In: Thimann, K. V., The physiology of forest trees, The Ronald press company, New York, 19–41.
Gunning, B. E. S. und Pate, J. S. (1969). "Transfer cells". Protoplasma, *68:* 107–133.
Haberlandt, G. (1914). Zur Physiologie der Zellteilung II. Sitzungsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften (1914): 1096–1111.
Haines, F. M. (1935). Observations on the occurrence of air in conducting tracts. Annals of botany, *49:* 367–370.
Higuchi, T., Shimida, M. und Watanabe, K. (1967). Studies on the mechanism of heartwood formation -VI- On the Artificial heartwood of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora*. Journal of the japanese wood research society, *13:* 274–279.
Holle, H. (1915). Untersuchungen über das Welken, Verwelken und Wiederstraffwerden. Flora, *108:* 73–126.
Huber, B. (1953). Vergleichende Betrachtung der pflanzlichen Ströme. Die Naturwissenschaften, *40:* 180–185.
Huber, B. und Rouschal, C. (1954). Mikrophotographischer Atlas Mediterraner Hölzer. Haller Verlag, Berlin-Grünewald, 105 pp.
IAWA (1964). Multilingual glossary of terms used in wood anatomy. Verlagsanstalt Buchdruckerei Konkordia, Winterthur.
Isenberg, I. H. (1933). Microchemical studies of tyloses. Journal of forestry, *31:* 961–966.
Ishida, S. und Ohtani, J. (1968). Study of tyloses by the scanning electron microscopy – Report 1 - Some preliminary observations of tyloses, mainly in Haru-nire (*Ulmus* sp.). Research bulletins of the college experiment forests, *26:* 1–9.
Ito, M. und Kishima, T. (1951). Studies on the tyloses – Their occurrence in the domestic wood. Wood research review, *3:* 44–55.
Jurásek, L. (1960). Studium osmotischer Drücke im Buchenholz und Möglichkeiten des Verhinderns der Thyllenentstehung (deutsche Zusammenfassung). Drevársky Vyskum, *5:* 129 bis 136.
Klein, G. (1923). Zur Ätiologie der Thyllen. Zeitschrift für Botanik, *15:* 417–439.
König, E. (1967). Fachkunde des Holzhandels. DRW-Verlag, Stuttgart, 575 pp.
Kollmann, F. F. P. (1941). Die Esche und ihr Holz. Verlag von Julius Springer, Berlin, 147 pp.
Kóràn, Z. und Côté, W. A. (1964). Ultrastructure of tyloses and a theory of their growth mechanism. IAWA bulletin, *2:* 3–15.
Kóràn, Z. und Côté, W. A. (1965). The ultrastructure of tyloses. In: Côté, W. A., Cellular ultrastructure of woody plants, Syracuse university press, 319–333.
Kóràn, Z. und Yang, K. C. (1972). Gum distribution in yellow birch. Wood science, *5:* 95–102.
Küster, E. (1903). Pathologische Pflanzenanatomie. Verlag von Gustav Fischer, Jena, 312 pp.
Landolt, E. (1977). Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröffentlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH, 64. Heft, Stiftung Rübel, Zürich.
Lohse, R. (1924). Entwurf einer Kritik der Thyllenfrage mit Ergebnissen einiger Versuche. Botanisches Archiv, *5:* 345–380.
Mäule, C. (1896). Der Faserverlauf im Wundholz. Bibliotheca botanica, *33:* 1–32.
Merrill, W. und Shigo, A. L. (1979). An expanded concept of tree decay. Phytopathology, *69:* 1158–1160.
etcalfe, C. R. und Chalk, L. (1950). Anatomy of the dicotyledons. Clarendon press, Oxford, Volume I d II.

Moeller, C. M. und Gram, K. (1959). Dark heartwood of ash. Journal of the Danish forestry association. Nielsen und Lydiche, Kopenhagen, reprint, 22 pp.

Nobuchi, T., Satô, T., Ryûtarô, I. und Harada, H. (1984). Season of heartwood formation and the related cytological structure of ray parenchyma cells in *Robinia pseudoacacia* L. Mokuzai gakkaishi, *30:* 628–636.

Obrien, T. P. (1970). Further observations on hydrolysis of the cell wall in the xylem. Protoplasma, *69:* 1–14.

Obst, J. R., Sachs, I. B. und Kuster, T. A. (1988). The quantity and type of lignin in tyloses of bur oak *(Quercus macrocarpa).* Holzforschung, *42:* 229–231.

Ott, E. (1982). Morphologische und physiologische Alterung von sekundärem Rindengewebe in *Larix decidua* Mill. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, *127:* 89–166.

Ouellette, G. B. (1978). Unusual cell wall layers in elm parenchyma of secundary xylem. Canadian journal of botany, *56:* 2109–2113.

Ouellette, G. B. (1980). Occurrence of tyloses and their ultrastructural differentiation from similarly configured structures in american elm infected by *Ceratocystis ulmi.* Canadian journal of botany, *58:* 1056–1073.

Paclt, J. (1953). Kernbildung der Buche (*Fagus sylvatica* L.). Phytopathologische Zeitschrift, *20:* 255–259.

Pactl, J. (1954). Wozu dienen die histogenen und gummösen Demarkationen im Holzgewebe? Flora, *141:* 111–113.

Parameswaran, N. und Bauch, J. (1975). On the origin of phenolic compounds in the wood rays of *Abies alba.* Wood science and technology, *9:* 165–173.

Parameswaran, N., Knigge, H. und Liese, W. (1985). Electron microscopic demonstration of a suberised layer in the tylosis wall of beech and oak. IAWA bulletin n. s., *6:* 269–271.

Pearce, R. B. und Holloway, P. J. (1984). Suberin in the sapwood of oak (*Quercus robur* L.): its composition in the compartmentalisation barrier and its occurrence in tyloses in undecayed wood. Physiological plant pathology, *24:* 71–81.

Praël, E. (1888). Vergleichende Untersuchungen über Schutz- und Kernholz der Laubbäume. Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik, *19:* 1–81.

Record, S. J., 1927. Occurrence of calcium carbonate deposits in woods. Tropical woods, *12:* 22–26.

Rier, J. P. und Shigo, A. L. (1972). Some changes in red maple, *Acer rubrum,* tissues within 34 days after wounding in July. Canadian journal of botany, *50:* 1783–1784.

Sachs, I., Kuntz, J., Ward, J., Nair, G. und Schultz, N. (1970). Tylose structure. Wood and fibre, *2:* 259–268.

Sameshima, K., Okumura, D., Kowano, H. und Kondo, T. (1967). Studies on the intermediate zone of sugi wood. Journal of the Japanese wood research society, *13:* 349–354.

Samitca, E. R. (1911). Notes sur la conservation des traverses en hêtre. H. Dunod et E. Pinat, Paris, 77 pp.

Sauter, J. J. (1972). Respiratory and phosphatase activities in contact cells of wood rays and their possible role in sugar secretion. Zeitschrift für Pflanzenphysiologie, *67:* 135–145.

Sauter, J. J., Iten, W. und Zimmermann, M. H. (1973). Studies on the release of sugar into the vessels of sugar maple *(Acer saccharum).* Canadian journal of botany, *51:* 1–8.

Sharon, E. M. (1972). Wounding induces a change in metabolic activity in cells of *Acer saccharum.* Second North American forest biology workshop, 15–16.

Sharon, E. M. (1974). An altered pattern of enzyme activity in tissues associated with wounds in *Acer saccharum.* Physiological plant pathology, *4:* 307–312.

Shibata, N., Harada, H. und Saiki, H. (1981). Difference in the development of incubated tyloses within the sapwood of *Castanea crenata* Sieb. et Zucc. Bulletin of the Kyoto university of forests, *53:* 231–240.

Shigo, A. L. (1986a). A new tree biology. Shigo and trees, associates, Durban, New Hampshire, USA, 595 pp.

Shigo, A. L. (1986b). A new tree biology, dictionary. Shigo and trees, associates, Durban, New Hampshire, *USA, 132 pp.*

Shigo, A. L. und Marx, H. G. (1977). Compartmentalization of decay in trees. Agriculture information bulletin, nr 405, forest service, US department of agriculture, 73 pp.
Shigo, A. L. und Sharon, E. M. (1970). Mapping colums of discolored and decayed tissues in sugar maple, *Acer saccharum*. Phytopathology, *60:* 232–237.
Sporne, K. R. (1974). The morphology of angiosperms. Hutchinson university library, London, 207 pp, ISBN 0099126111.
Stern, W. L. (1978). A retrospective view of comparative anatomy, phylogeny, and plant taxonomy. IAWA bulletin, *2:* 33–39.
Stewart, C. M. (1967). Moisture content of living trees. Nature, *214:* 138–140.
Strasburger, E., Noll, F., Schenck, H. und Schimper, A. F. W. (bearbeitet von Denffer, D. von, Schumacher, W., Mägdefrau, K. und Ehrendorfer, F.) (1971). Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 30. Auflage, 842 pp.
Streslis, I. und Green, H. V. (1962). Tyloses and their detection. Pulp and paper magazine of Canada, *63:* T307–310, 330.
Swain, T. (1960). Some interrelations between leuco-anthocyanins and lignin in plants. In: Pridham, J. B., Phenolics in plants in health and disease, Pergamon press, New York, 131 pp.
Swain, T. (1965). The tannins. In: Bonner, J. und Varner, J. E., Plant biochemistry, Academic press, New York, 552–579.
Takhtajan, A. (1966). Flowering plants. Origin and dispersal. Oliver and Boyd, Edinburg.
Tison, A. (1900). Recherches sur la chute des feuilles chez les dicotylédones. Mémoires de la société Linnéenne de Normandie, *20:* 121–327.
Toit, A. J. (1964). The influence of tyloses on the manufacture of matches. South African Forestry Journal, *50:* 27–38.
Trendelenburg, R. (bearbeitet von Mayer-Wegelin, H.) (1955). Das Holz als Rohstoff. Carl Hauser Verlag, München, 541 pp.
Wardrop, A. B. und Cronshaw, J. (1962). Formation of phenolic substances in the ray parenchyma of angiosperms. Nature, *193:* 92.
Weber, F. (1919). Der natürliche Tod der Pflanzen. Naturwissenschaftliche Wochenschrift, *34:* 449–457, 465–471.
Wheeler, E. A. und Thomas, R. J. (1981). Ultrastructural characteristics of mature wood of southern red oak (*Quercus falcata* Michx.) and white oak (*Quercus alba* L.). Wood and fibre, *13:* 169–181.
Wieler, A. (1888). Über den Anteil des secundären Holzes der dicotyledonen Gewächse an der Saftleitung und über die Bedeutung der Anastomosen für die Wasserversorgung der Transpirierenden Flächen. Jahrbücher für die wissenschaftliche Botanik, *19:* 82–137.
Wiesner, J. (1885a). Über das Gummiferment. Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, I. Abteilung, *92:* 40–67.
Wiesner, J. (1885b). Über ein Ferment, welches in der Pflanze die Umwandlung der Cellulose in Gummi und Schleim bewirkt. Botanische Zeitung, *43:* 577–583.
Winkler, H. (1906). Über einen neuen Thyllentypus nebst Bemerkungen über die Ursachen der Thyllenbildung. Annales du jardin botanique de Buitenzorg, *20:* 19–37.
Wooding, F. B. P. und Northcote, D. H. (1965). An anomalous wall thickening and its possible role in the uptake of stem-fed tritiated glucose by *Pinus picea*. Journal of Ultrastructure research, *12:* 463–472.
Zimmermann, M. H. (1983). Tyloses, gums, and suberization. In: Zimmermann, M. H., Xylem structure and the ascent of sap, Springer-Verlag, Berlin, 101–104.
Zimmermann, M. H. und Milburne, J. A. (1982). Transport and water storage. In: Lange, O., Novel, P. S., Osmond, C. B. und Ziegler, H., Encyclopedia of plant physiology, n. s., Physiological plant ecology – II – Water relations and carbon assimilation, Springer-Verlag, Berlin, 12B: 135–151.
Zycha, H., 1948. Über die Kernholzbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. Forstwissenschaftliches Centralblatt, *67:* 80–109.

Dr. Karel J. M. Bonsen, Departement Wald- und Holzforschung, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/1: 51–65

Toxikologische Prüfung von biotechnologisch hergestellten Arzneimitteln

Gerhard Zbinden, Institut für Toxikologie, ETH und Universität Zürich

Durch grundlegend neue Methoden der Biotechnologie ist es möglich geworden, hochaktive Wirksubstanzen, die vom menschlichen Körper selbst synthetisiert werden, in grossen Mengen und in reiner Form zu fabrizieren. Dadurch werden völlig neue Therapiemöglichkeiten eröffnet. Für die experimentelle Prüfung der Unbedenklichkeit dieser Arzneimittel ergeben sich zahlreiche neue Probleme. Die wichtigsten sind die besondere Bedeutung der artspezifischen Reaktionen auf viele dieser nur beim Menschen vorkommenden Substanzen und die immunologischen Prozesse, die bei den Versuchstieren durch Verabreichung artfremder Eiweisse ausgelöst werden. Die bisherige Erfahrung hat aber gezeigt, dass wenigstens ein Teil der für den Menschen wichtigen Nebenwirkungen auch im Experiment erfasst werden kann. Es ist aber notwendig, von der konventionellen Prüfmethodik abzurücken und für jedes neue Biotechnologieprodukt auch für die Sicherheitsuntersuchungen einen wissenschaftlich fundierten und mit modernen Methoden ergänzten Prüfplan aufzustellen.

Toxicological Assessment of Drugs Obtained by Biotechnology

Through application of fundamentally new methods of biotechnology it has become possible to manufacture pure, biologically highly active proteins and polypeptides. With these substances exciting new therapeutic possibilities were created. For the experimental assessment of safety of biotechnology product, many new problems have arisen. The major ones are the species-specificity of many of these agents that normally occur only in humans, and the immunological processes set into motion when these proteins and polypeptides are administered to laboratory animals. Nevertheless, experience gathered up to date indicates that at least part of the adverse effects of biotechnologically manufactured drugs can be detected in animal experiments. However, it is necessary to abandon the conventional safety testing methods and to develop testing strategies that take into consideration all biological and chemical characteristics of each individual new drug.

1 Biotechnologische Revolution in der Arzneimittelforschung

Hochspezialisierte Polypeptide und Eiweisse[1] spielen für die Funktion aller Lebewesen eine ungeheuer wichtige Rolle: Innerhalb der Zelle sind es die Enzyme, die die meisten biochemischen Vorgänge steuern. An der Zelloberfläche befinden sich weitere wichtige Eiweissmoleküle, die als Rezeptoren den Kontakt mit anderen Zellarten, z.B. den Zellen des Immunsystems, und mit endogenen, d.h. vom Körper selbst hergestellten Wirkstoffen wie Hormone, Überträgersubstanzen und Wachstumsregulatoren herstellen. Die grosse Mehrzahl dieser Signalstoffe sind ebenfalls Polypeptide und Eiweisse. Sie werden von spezialisierten Zellen synthetisiert und in die nähere Umgebung, häufig auch direkt in den Blutkreislauf abgegeben.

[1] Polypeptide sind Ketten aus 10 bis ca. 100 Aminosäureresten. Eiweisse (Proteine) sind gleich gebaut, bestehen aber aus einer grösseren Zahl von verknüpften Aminosäureresten.

Das Fehlen oder die mangelhafte Funktion eines dieser Polypeptide und Eiweisse sind wichtige Krankheitsursachen. Aus der in die Tausende gehenden Zahl derartiger Leiden seien nur einige erwähnt, z. B. die ungenügende Produktion von Wachstumshormon in der Hirnanhangdrüse, die Zwergwuchs bewirkt, Insulinmangel, der zu Zuckerkrankheit führt, und fehlerhafte Funktion des Enzyms Glukose-6-phosphat Dehydrogenase, welche zu erhöhter Bereitschaft für Blutzerfall (Hämolyse) Anlass gibt. Seit langem versucht man, derartige «Mangelkrankheiten» durch Ersatztherapien zu kontrollieren. Man behandelt beispielsweise Zwergwuchs mit Wachstumshormon aus Hirnanhangdrüsen verstorbener Menschen und Zuckerkranke mit Insulin, das aus Bauchspeicheldrüsen von Schweinen extrahiert wurde. Beide Wirkstoffe können in die Blutbahn injiziert werden und gelangen so an ihre Wirkungsorte.

Die Möglichkeiten, derartige lebenswichtige Stoffe in genügender Menge aus tierischem oder sogar menschlichem Gewebe zu gewinnen, sind aber sehr beschränkt. Besonders kritisch ist ausserdem, dass die wiederholte Injektion tierischer Eiweisse beim Menschen häufig zu gefährlichen allergischen Reaktionen führt. Hier hat nun die Gentechnologie einen radikalen Wandel gebracht: Es ist jetzt möglich, aus der Erbsubstanz menschlicher Zellen (DNS, Desoxyribonukleinsäure) das Stück herauszuschneiden, das in den Zellen die Herstellung des gesuchten Eiweisses oder Polypeptides steuert. Mit Hilfe eines Vektors, d. h. eines biologischen Überträgersystems, kann dieses Stück Erbmaterial in ein Bakterium (meistens ein Colibakterium) oder eine leicht zu züchtende menschliche oder tierische Zelle verpflanzt werden. Die so «gen-manipulierten» Bakterien und Zellen sind jetzt in der Lage, das menschliche Eiweiss oder Polypeptid herzustellen. Man kann sie in grossen Fermentiertanks beliebig vermehren und kann aus den Kulturen den menschlichen Wirkstoff isolieren und für therapeutische Zwecke einsetzen.

Zu Beginn dieser Entwicklung hat man natürlich nach Stoffen gesucht, die zur «Substitutionstherapie», d. h. als Ersatz eines vom kranken Menschen nicht mehr gebildeten Wirkstoffs, eingesetzt werden konnten. Das erste derartige Präparat, das auf dem Markt eingeführt wurde, war menschliches Insulin. Kurz darauf wurden gentechnologisch hergestelltes menschliches Wachstumshormon und der für die Auflösung von Blutgerinnseln wichtige Gewebeplasminogen-Aktivator (tissue plasminogen activator, TPA) verfügbar. Das neuste dieser Präparate ist menschliches Erythropoietin, ein normalerweise von der Niere synthetisierter Stoff, der das Knochenmark zur Bildung roter Blutkörperchen anregt und der bei schwerer Blutarmut (Anämie) lebensrettend wirken kann. Eine Auswahl weiterer z.Z. in Entwicklung stehender menschlicher Proteine und Polypeptide sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Den bis jetzt beschriebenen, gentechnologisch hergestellten Wirkstoffen ist gemeinsam, dass sie ein relativ schmales Wirkungsspektrum besitzen, d.h. sie erfüllen eine gut umschriebene und deshalb auch leicht verständliche Aufgabe. Daneben gibt es aber auch endogene Wirkstoffe, die eine pleiotrope Wirkung besitzen, d.h. sie greifen fördernd oder hemmend in eine grosse Zahl von

Tabelle 1 Auswahl biotechnologisch hergestellter menschlicher Polypeptide und Eiweisse

Insulin	Blutprodukte:
Wachstumshormon	Gerinnungsfaktoren (Faktor VIII, IX)
Erythropoietin	Albumin
Lymphokine	Komplement Bestandteile
Tumor necrosis factor	
Gewebeplasminogen Aktivator (TPA)	
Prourokinase	
Atrial natriuretic factor	
Lung surfactant	
Epidermaler Wachstumsfaktor	

Lebensvorgängen ein und beeinflussen deshalb viele Organsysteme. Die z.Z. wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind die als Zytokine bezeichneten Proteine. Als bedeutungsvollste Vertreter dieser Stoffklasse sind bis jetzt die Interferone und Interleukine identifiziert worden (R.V. Smalley und E.C. Borden, 1986; S.B. Mizel, 1989). Sie werden hauptsächlich von Zellen des Immunsystems hergestellt und in den Körper abgegeben. Sie dienen der Kommunikation und Koordination innerhalb des Immunsystems, was für eine optimale Abwehr gegen infektiöse Eindringlinge und bösartig umgewandelte Zellen (Krebszellen) unerlässlich ist. Mehr und mehr erkennt man aber, dass diese Stoffe auch andere Organe und Gewebe wie z.B. das Nervensystem beeinflussen und z.T. auch von Geweben ausserhalb des Immunsystems synthetisiert werden. Als Beispiel für das ausserordentlich breite Spektrum der Zytokine seien einige Wirkungen von Interferonen erwähnt. Die Substanzen dieser Stoffklasse wurden ursprünglich als von Zellen gebildete Abwehrstoffe gegen Virusinfektionen erkannt. Seither sind aber zahlreiche weitere Funktionen bei der Kontrolle zellulärer Vorgänge erforscht worden. In einer kürzlich veröffentlichten Übersichtsarbeit über die Wirkungsweise von Interferon α erwähnt beispielsweise B.R.G. Williams (1988) 13 Gene, deren Expression durch die Substanz entweder gefördert oder gehemmt, über 10 Enzyme, deren Funktion moduliert, sowie zahlreiche wichtige Zellbestandteile und Rezeptoren, deren Synthese ebenfalls nachhaltig beeinflusst wird. Mit der Herstellung dieser Zytokine durch biotechnologische Verfahren begann vor wenigen Jahren eine therapeutische Fahrt ins Ungewisse, eine Entwicklung, die für bisher unheilbare Krankheiten wie Krebs, Aids, Gelenkrheumatismus, multiple Sklerose usw. neuartige therapeutische Aussichten eröffnet.

2 Überlegungen zur Sicherheit biotechnologisch hergestellter Arzneimittel

Die neuen, durch Gentechnologie hergestellten Substanzen unterscheiden sich von den herkömmlichen Medikamenten durch zwei wesentliche Eigenschaften.

Die erste betrifft die Herstellungsart. Die neuen Verbindungen werden nicht durch Zusammenfügen chemischer Bausteine synthetisiert, sondern es werden lebende Zellen dazu angeregt, die menschlichen Proteine und Polypeptide zu fabrizieren. Die Schwierigkeit bei dieser Methode besteht darin, den in sehr geringen Mengen vorhandenen Wirkstoff aus der Zellkultur zu isolieren und ihn von den Bestandteilen der Nährflüssigkeit und den Überresten der produzierenden Mikroorganismen und Zellen zu reinigen, ohne dass er durch diese Prozedur in irgendeiner Weise verändert wird. Für diese Aufgabe konnte man zum Teil auf die Erfahrungen mit der Herstellung von Antibiotika zurückgreifen, da auch diese Substanzen von Mikroorganismen (Schimmelpilzen) gebildet werden. Die Produktion von Biotechnologieprodukten der neuen Generation ist aber wesentlich komplexer. Als weitere Schwierigkeit kommt dazu, dass als «Wirtsorganismen» oft Nagetierzellen verwendet werden, deren Verseuchung mit einer grossen Zahl von Viren nur schwer unter Kontrolle gehalten werden kann. Zudem müssen Zellkulturen, die für die Dauerproduktion eingesetzt werden, die Eigenschaft besitzen, sich uneingeschränkt zu vermehren, d. h. sie müssen unsterblich sein. Dieses besondere Merkmal ist aber gleichbedeutend mit Bösartigkeit. Man ist also gezwungen, als Produzenten der Biotechnologieprodukte Krebszellen einzusetzen, und es besteht dadurch wenigstens ein theoretisches Risiko, dass Erbsubstanz für Krebs, auch onkogene DNS genannt, in das Endprodukt gelangen kann. Ob dies für die Patienten ein reales Risiko bedeutet, kann nicht mit Sicherheit entschieden werden.

Weder die Hersteller der Präparate noch die Gesundheitsbehörden waren aber bereit, den Patienten das Risiko einer Gefährdung durch Verunreinigungen zuzumuten. Deshalb stand das Problem der Reinheit und Qualitätskontrolle in den ersten Jahren der Entwicklung biotechnologisch hergestellter Arzneimittel ganz im Vordergrund des Interesses. Durch einen immensen technologischen Aufwand ist es jetzt gelungen, sehr zuverlässige Reinigungsverfahren zu entwickeln und gleichzeitig hochempfindliche Detektorsysteme aufzubauen, die es erlauben, alle möglichen Verunreinigungen, auch die onkogene DNS, in minimalsten Konzentrationen festzustellen. Die Qualitätssicherung ist somit gewährleistet, und es sind denn auch beim klinischen Einsatz der bis jetzt eingeführten Präparate keine schädlichen Wirkungen, die auf Verunreinigungen zurückgeführt werden könnten, beobachtet worden.

Die zweite Besonderheit der biotechnologisch hergestellten Arzneimittel besteht darin, dass es sich in der Regel um genaue Kopien von Wirkstoffen handelt, die vom menschlichen Organismus selbst hergestellt werden. Es ist zwar vorauszusehen, dass in der Zukunft auch Stoffe eingesetzt werden, die durch chemische Modifikationen geringgradig vom natürlichen Präparat abweichen. Zur Zeit stehen aber fast nur Proteine und Polypeptide in der Entwicklung, die sich nicht vom natürlichen Produkt unterscheiden. Es ist verständlich, dass man die Voraussage wagen durfte, dass diese Art von Wirkstoffen bei therapeutischer Verwendung beim Menschen keine unerwarteten schädlichen Wirkungen haben würde. Die klinischen Beobachtungen bei Patienten, die mit

menschlichem, biotechnologisch hergestelltem Insulin und Wachstumshormon behandelt wurden, bestätigten diese Annahme.

Ganz anders waren jedoch die Erfahrungen mit den Interferonen. Bei dieser Substanzklasse handelt es sich um Zytokine, wichtige Stoffe, die für die geordnete Funktion des Immunsystems verantwortlich sind und die deshalb zur Hauptsache für die Behandlung bösartiger Tumoren und von Viruskrankheiten in klinische Prüfung genommen wurden (H. Kirchner, 1984). Bei dieser Stoffklasse unterscheidet man drei Haupttypen, das Interferon-α, das von weissen Blutkörperchen gebildet wird, das Interferon-β, hauptsächlich von Bindegewebszellen gemacht, und das Interferon-γ, das von stimulierten T-Zellen (Immunzellen) stammt (R. V. Smalley und E. C. Borden, 1986). Obwohl sich diese Typen durch chemische und biologische Eigenschaften etwas unterscheiden, sind die unerwünschten Wirkungen, die man beim Menschen unerwarteterweise feststellen musste, sehr ähnlich und können deshalb für diese Übersichtsarbeit gemeinsam behandelt werden.

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Nebenwirkungen bei therapeutischer Anwendung von Interferon-α zusammengestellt. Besonders auffallend und bei allen Patienten in geringerem oder stärkerem Mass zu beobachten ist ein grippeartiges Krankheitsbild mit Fieber, Müdigkeit und Abgeschlagenheit. Daneben finden sich bei einem Teil der Behandelten Störungen anderer Organfunktionen, namentlich der Leber, der Herz-Kreislauf-Organe und des Nervensystems (K. Fent and G. Zbinden, 1987). Aufgrund dieser klinischen Erfahrungen musste man die Gefahren der therapeutischen Anwendung von biotechnologisch hergestellten Arzneimitteln, insbesondere von Zytokinen, neu überdenken. Spätere Beobachtungen mit anderen Vertretern dieser Stoffklasse bestätigten, dass die ursprünglich gehegte Erwartung, alle den menschlichen Eiweissen und Polypeptiden nachgebildeten Präparate würden ohne ernsthafte

Tabelle 2 Nebenwirkungen der Interferontherapie (K. Fent and G. Zbinden, 1987)

Allgemeinsymptome:	*Fieber, Kopfschmerzen, Muskel- und Gelenkschmerzen, Übelkeit, Erbrechen,* Durchfall, *Appetitlosigkeit, Gewichtsverlust.*
Blut:	*Abfall der weissen Blutkörperchen* und der Blutplättchen, Anämie.
Leber:	Funktionsstörungen und *Anstieg der Leberenzyme* (Aminopeptidasen) im Serum, Gelbsucht.
Niere:	Funktionsstörungen, Eiweiss im Urin.
Herz-Kreislauf:	Herzklopfen, Anstieg oder Abfall des Blutdrucks, Herzrhythmusstörungen.
Nervensystem:	*Müdigkeit, Lethargie, Schwäche.* Verwirrtheit, Gefühlsstörungen, Depression.
Lunge:	Kurzatmigkeit.
kursiv:	häufig beobachtet

Nebeneffekte vertragen, leider nicht zutraf. Die Ansicht, dass experimentelle Sicherheitsprüfungen für menschliche Proteine und Polypeptide wenig sinnvoll seien, musste man revidieren. In den letzten Jahren ist deshalb die Frage, wie man derartige Untersuchungen durchführen sollte, zu einem Thema geworden, mit dem sich Wissenschafter in der Industrie, in akademischen Instituten und in Gesundheitsbehörden intensiv befassen (J. Weissinger, 1989).

3 Problematik der experimentellen Sicherheitsprüfung

Für Arzneimittel, die mit konventionellen Methoden der chemischen Synthese hergestellt werden, gibt es ein Prüfschema, das erlaubt, die toxischen Eigenschaften zum grossen Teil zu erkennen und die Gefahren für den Menschen zu beurteilen (G. Zbinden, 1985). Vor der Durchführung klinischer Prüfungen einer neuen Verbindung am Menschen muss ein Teil dieser Studien abgeschlossen sein, und eine weitergehende Prüfung, die sich auch mit den Möglichkeiten der erbgutschädigenden und krebserzeugenden Wirkungen und den Einflüssen auf das ungeborene Kind bei Behandlung von Schwangeren befasst, muss den Gesundheitsbehörden mit den Registrierungsunterlagen vorgelegt werden (S. Alder and G. Zbinden, 1988). Für die biotechnologisch hergestellten Eiweisse und Polypeptide ist jedoch eine unkritische Anwendung dieser Prüfvorschriften nicht sinnvoll, handelt es sich doch um sehr grosse Moleküle, welche das Immunsystem der Versuchstiere als «fremd» erkennt und mit einer allergischen Reaktion beantwortet. Konventionelle Medikamente sind in der Regel kleine Moleküle, gegen die in den weitaus meisten Fällen keine artspezifischen, allergischen Abwehrreaktionen auftreten. Aus diesem Grund haben sich Gesundheitsbehörden und Toxikologen geeinigt, für die experimentelle Abklärung unerwünschter Eigenschaften von biotechnologisch hergestellten Verbindungen einen «case by case approach» zu verwenden, das heisst, die Untersuchungen werden für jedes Präparat individuell geplant und in enger Konsultation mit den Behörden und den akademischen Experten durchgeführt.

Die meisten Leser dieses Beitrags sind gewiss an den technischen Details einer toxikologischen Prüfung neuer Biotechnologieprodukte wenig interessiert. Es sollen deshalb nur die grundsätzlichen Überlegungen beschrieben werden, die der Toxikologe für die Lösung dieser kniffligen Fragen machen muss. Dazu ist es notwendig, sich die drei wichtigsten Möglichkeiten einer Schädigung durch biotechnologisch hergestellte Arzneimittel zu vergegenwärtigen. Es sind dies 1) die Gefahren durch Verunreinigungen, die bereits behandelt wurden, 2) toxische Reaktionen, die durch die pharmakodynamischen, d.h. die erwünschten, therapeutischen Eigenschaften bedingt sind, und 3) die biolo-[illegible]hen Reaktionen (G. Zbinden, 1990a).

4 Unerwünschte Wirkungen bedingt durch therapeutische (pharmakodynamische) Eigenschaften

Wie bei den herkömmlichen Arzneimitteln ist eine übersteigerte pharmakodynamische (den erwünschten therapeutischen Effekt erzeugende) Wirkung auch bei den Biotechnologieprodukten möglich. Die häufigste Ursache ist eine zu hohe Dosierung. So führt Insulin, das den erhöhten Blutzuckerwert normalisieren sollte, im höheren Dosenbereich zu einem Abfall der Blutzuckerkonzentration unter den Normalwert, was sich in einem lebensbedrohlichen Schockzustand (hypoglykämisches Coma) äussert. Diese Gefahr kann im Tierexperiment ohne weiteres erkannt werden, da menschliches Insulin auch bei Laboratoriumstieren wirkt.

Wie bereits erwähnt, basiert die Wirkung von biotechnologisch hergestellten Arzneimitteln meistens auf einer Interaktion mit spezifischen Rezeptoren, d. h. hochspezialisierten Eiweissmolekülen, die sich auf der Oberfläche von reagierenden Zellen befinden. Es ist verständlich, dass die menschlichen Wirkstoffe, die biotechnologisch hergestellt werden, bei Laboratoriumstieren nur dann die erwünschten therapeutischen und natürlich auch die damit zusammenhängenden toxischen Wirkungen ausüben, wenn das Tier an der Oberfläche seiner Zellen Rezeptoren besitzt, die denjenigen des Menschen ähnlich sind. Wie oben erwähnt, trifft das für Insulin und Insulinrezeptoren zu. Dagegen besitzen die meisten Tiere keine auf menschliche Interferone ansprechenden Rezeptoren, was erklärt, dass die auf übersteigerter pharmakodynamischer Wirkung beruhenden Nebeneffekte dieser Zytokine im konventionell durchgeführten toxikologischen Tierexperiment nicht festgestellt werden konnten (K. Teelmann et al., 1986). Ausdehnung der Untersuchungen auf Primaten hatte einen gewissen Erfolg, konnten doch sowohl antivirale Wirkungen als auch einige charakteristische toxische Effekte (Fieber, Abfall der weissen Blutkörperchen) bei Rhesusaffen nachgewiesen werden (H. Schellekens et al., 1982).

Glücklicherweise erwiesen sich die Erfahrungen mit den Interferonen als Ausnahme. Mit anderen Zytokinen und ähnlichen Wachstumsstimulatoren und -regulatoren hat es sich gezeigt, dass sowohl die erwünschten (pharmakodynamischen) wie die beim Menschen beobachteten schädlichen (toxischen) Effekte bei Laboratoriumstieren wenigstens zum Teil erkannt werden können. Als Beispiel sei das menschliche, rekombinante (biotechnologisch hergestellte) Interleukin-2 erwähnt. Es ist ein Zytokin, welches neben vielen anderen Wirkungen auch die Eigenschaft besitzt, sogenannte Killerzellen, d. h. spezialisierte Zellen, die Krebszellen und virusinfizierte Zellen zerstören, zu aktivieren, d. h. zum Wachstum und zur verstärkten Funktion anzuregen. Tabelle 3 zeigt eine Liste der unerwünschten und zum Teil gefährlichen Wirkungen, die beim Menschen nach Behandlung mit hohen Dosen Interleukin-2 beobachtet werden. Aus der Tabelle ist auch ersichtlich, dass die meisten dieser Schädigungen bei Ratten und Mäusen ebenfalls erzeugt werden können (T. D. Anderson et al., 1988; T. D. Anderson and T. J. Hayes, 1989).

Tabelle 3 Toxische Wirkungen von Interleukin-2

	Mensch	Maus	Ratte
Fieber, Frösteln, Unpässlichkeit	+		
Übelkeit, Erbrechen	+		
Durchfall			+
Ergüsse und Ödeme	+	+	+
Anämie	+		+
Nesselfieber	+		
Abfall der Blutplättchen	+	+	+
Anstieg der weissen Blutkörperchen	+	+	+
Anstieg der eosinophilen Leukozyten	+	+	+
Abfall des Serumalbumins	+	+	+
Blutdruckabfall	+		
Leberschädigung	+	+	+
Nierenschädigung	+	+	+
Verwirrungszustände	+		

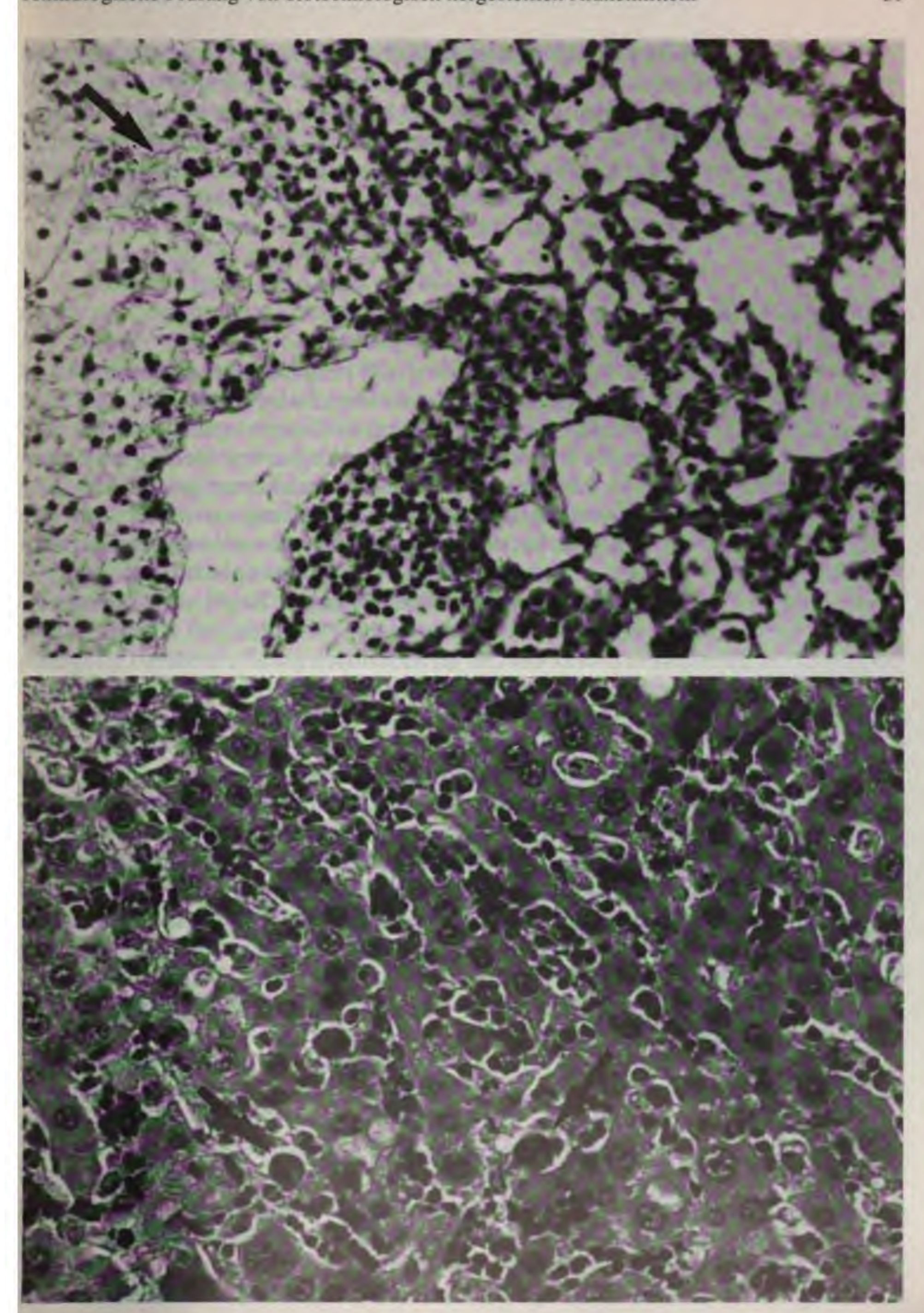
Bei Mensch und Tier sind sehr verschiedenartige Organsysteme von der Interleukin-2-Toxizität betroffen. Besonders ungewöhnlich ist das «vascular leak syndrome», ein Zustand, bei dem Blutflüssigkeit in die Gewebe (Ödem) und in die Körperhöhlen (Ergüsse) austritt. Bild 1 zeigt einen Schnitt durch die Lunge einer mit Interleukin-2 behandelten Ratte. Das Ödem, d. h. die Auflokkerung der Gewebe durch Flüssigkeitsdurchtränkung, ist gut sichtbar. Bild 2 zeigt die feingeweblichen Veränderungen der Leber dieses Tiers. Die Zerstörung einzelner Leberzellen ist erkennbar. In beiden Geweben fällt eine Ansammlung ziemlich grosser, rundlicher Zellen auf. Es handelt sich hauptsächlich um Killerzellen, die sich unter dem Einfluss der Interleukin-2-Behandlung stark vermehrt haben und nun auch normale Zellen in der Leber, der Lunge und anderen Organen zerstören (T. D. Anderson and T. J. Hayes, 1989). Die toxischen Erscheinungen bei Interleukin-2-Behandlung beruhen somit auf einer übersteigerten pharmakodynamischen Wirkung, die nur durch Herabsetzung der Dosis vermieden werden kann (T. D. Anderson et al., 1988).

Bild 1: Lunge einer Ratte, die mit menschlichem, biotechnologisch hergestelltem Interleukin-2 behandelt wurde (18 Millionen Einheiten pro kg Körpergewicht pro Tag intravenös während 2 Wochen). Ödematöse Auflockerung des Zwischengewebes (Pfeil) und Ansammlung zahlreicher Infiltratzellen (eosinophile Leukozyten und Lymphozyten). (HE, 140x.)

Fig. 1: Lung of a rat treated with human recombinant interleukin-2 (18 million units per kg body weight per day intravenously for 2 weeks). Edema of the interstitial tissue (arrow) and infiltration with eosinophile leukocytes and lymphocytes. (HE, magn. 140x.)

Bild 2: Leber, gleiches Tier wie in Abb. 1. Einzelzellnekrosen von Leberzellen (Pfeil) und Durchsetzung mit Infiltratzellen (eosinophile Leukozyten und Lymphozyten). (HE, 140x.)

Fig. 2: Liver, same animal as in Fig. 1. Single cell necroses of hepatocytes (arrow) and infiltration with eosinophile leukocytes and lymphocytes. (HE, magn. 140x.)



Aufgrund der Erfahrungen mit Interleukin-2 und anderen Zytokinen kann der Schluss gezogen werden, dass die tierexperimentelle Vorprüfung von Biotechnologieprodukten immer dann erfolgversprechend ist, wenn eine Versuchstierart gefunden wird, bei der auch die therapeutischen Wirkungen nachweisbar sind. Steht keine derartige Tierart zur Verfügung, dann ist die Erkennung toxischer Eigenschaften problematisch, und es müssen andere Wege gesucht werden, um wenigstens einen Teil der Gefahren zu erfassen.

5 Biologische Reaktionen

Eine weitere Besonderheit der biotechnologisch hergestellten Arzneimittel ist ihre Fähigkeit, in menschlichen und tierischen Organismen bestimmte, an sich physiologische, d. h. normale Reaktionsprozesse in Gang zu setzen. Am häufigsten handelt es sich um die bereits erwähnten allergischen Reaktionen. Das Immunsystem, das zur Abwehr gegen Infektionen und bösartige Geschwülste dient, erkennt auch artfremde Eiweissmoleküle und reagiert darauf mit der Bildung von Antikörpern und Vermehrung von Abwehrzellen (zytotoxische T-Zellen). Es ist zwar der grosse Vorteil der gentechnologisch hergestellten, menschlichen Proteine und Polypeptide, dass sie in der Regel vom Menschen gut vertragen werden, da sie sich von den entsprechenden, im Körper selbst hergestellten Substanzen nicht oder nur unwesentlich unterscheiden. Gelegentlich kommt es aber trotzdem zu einer allergischen Reaktion, da bei der Herstellung der Biotechnologieprodukte geringfügige Veränderungen entstehen, die der Körper feststellt und mit der Bildung von Antikörpern beantwortet.

Als Beispiel sei das menschliche Wachstumshormon erwähnt, das zuerst mit Hilfe eines gentechnologisch veränderten Colibakteriums hergestellt wurde. Es unterschied sich vom natürlichen Hormon lediglich durch eine Methionylgruppe, eine winzige chemische Variation, die aber dazu führte, dass die behandelten Patienten oft neutralisierende Antikörper herstellten. Dabei handelt es sich um Abwehrstoffe, die zu einer prompten Elimination des als fremd erkannten Hormons führten. Erst bei Verwendung einer genmanipulierten Zelle konnte dann menschliches Wachstumshormon hergestellt werden, welches das unerwünschte chemische Anhängsel nicht besass und das viel seltener zu Bildung von Antikörpern führte (Takano, 1987).

Viel wichtiger als beim Menschen ist die allergische Reaktion natürlich bei Versuchstieren, denen die Präparate zur toxikologischen Prüfung wiederholt verabreicht werden. Ihr Immunsystem erkennt die menschlichen Proteine und Polypeptide als «fremd» und beginnt sofort, sich dagegen zu wehren. In der Regel dauert es etwa einen Monat, bis Versuchstiere gegen die Testpräparate nachweisbare Konzentrationen von neutralisierenden Antikörpern gebildet haben. Da diese Abwehrstoffe die Testpräparate binden und dadurch inaktivieren, ingt eine längerdauernde Behandlung für die toxikologische Untersuchung inen Gewinn an Information. In seltenen Fällen entwickeln sich die

allergischen Reaktionen sogar schon früher. So wurden beispielsweise bei Hunden, denen man menschliche, gentechnologisch hergestellte Prourokinase (ein Wirkstoff, der zur Auflösung von Blutgerinnsel dient) zur toxikologischen Prüfung verabreichte, akute allergische Reaktionen, die an ein heftiges Nesselfieber erinnerten, festgestellt, und die Studie musste nach kurzer Behandlungszeit beendet werden. Im Blut dieser Tiere waren hohe Konzentrationen von Antikörpern gegen den Wirkstoff nachweisbar (E. Esser, Grünenthalforschung, persönliche Mitteilung).

Aus diesen Beobachtungen ergibt sich, dass wegen der an sich normalen, durch die artfremden Testsubstanzen induzierten Abwehrreaktionen des Immunsystems menschliche Biotechnologieprodukte nur kurzzeitig an Versuchstieren geprüft werden können. Das ist ein schwerwiegender Nachteil, ist es doch damit nicht mehr möglich, unerwünschte Langzeiteffekte zu erkennen. Will man also biotechnologisch hergestellte Arzneimittel zur Dauertherapie einsetzen, dann tritt anstelle der tierexperimentellen Sicherheitsprüfung wohl oder übel das Langzeitexperiment am Menschen. Für die Kliniker ergibt sich damit die Verpflichtung, derartige Präparate mit grosser Vorsicht zu verwenden, namentlich wenn eine Langzeittherapie durchgeführt werden muss.

Hinweise auf eine weitere, hochinteressante biologische Reaktion ergaben sich aus den Beobachtungen von Veränderungen des Nervensystems, die bei Patienten, die mit Interferonen und anderen Zytokinen behandelt wurden, gehäuft vorkamen. Einerseits handelte es sich um Fieberzustände, anderseits um psychische Störungen, besonders Müdigkeit, Abgeschlagenheit und Schläfrigkeit. Die Fieberzustände, so weiss man heute, sind die Folge einer typischen biologischen Reaktion, wie sie auch bei akuten Infektionskrankheiten, z. B. einer Grippe, auftritt, d.h. es wird im Gehirn durch die Zytokine ein an sich physiologischer Reaktionsmechanismus in Gang gesetzt. Als zentrale Wirksubstanz wurde Interleukin-1 erkannt, ein vom Organismus selbst gemachtes Zytokin, das mannigfache Steuerungsfunktionen ausübt und auch als endogenes Pyrogen, d. h. eine vom Körper selbst hergestellte, fiebererzeugende Substanz, wirkt. Durch andere Zytokine wird Interleukin-1 freigesetzt und löst damit eine ganze Kaskade von biologischen Reaktionen aus, die schliesslich zu Bildung einer weiteren, hochaktiven Wirksubstanz, dem Prostaglandin E_2, führt (C. A. Dinarello et al., 1984). Die Bildung dieser Substanz kann durch gewisse entzündungshemmende Arzneimittel, die man aus der Rheumatherapie kennt, unterbunden werden. Dank dieser Erkenntnis hat man nun auch ein Mittel in der Hand, die durch gentechnologisch hergestellte Zytokine ausgelösten Fieberreaktionen zu verhindern.

Viel schwieriger war die Erklärung der psychischen Störungen, die sich, z. B. bei mit Interferon behandelten Patienten, nicht nur in Müdigkeit und Schläfrigkeit, sondern auch in einer deutlichen Verlangsamung der Hirnströme (gemessen durch das Elektroenzephalogramm) äussern. Erst als es gelang, in einem Tierexperiment ein ähnliches Phänomen zu erzeugen, konnten die eigenartigen psychischen Störungen erklärt werden.

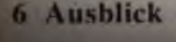
Das Tierexperiment, das die wesentlichsten Erkenntnisse lieferte, ist ein Schlafversuch mit Kaninchen. Während des Schlafes können mit Hilfe des Elektroenzephalogramms (wie übrigens auch beim Menschen) zwei unterschiedliche Schlaftypen festgestellt werden, nämlich der sog. «rem sleep», der durch schnelle Hirnströme gekennzeichnet ist, und der «slow wave sleep», der im Elektroenzephalogramm von langsamen Hirnwellen begleitet ist. Infusion von Interferon und anderen Zytokinen führte bei den Kaninchen zu einer Zunahme der langsamen Hirnwellen, d.h. des «slow wave sleep» (J. M. Krueger, 1990). Diese grundlegende Beobachtung konnte später in anderen Tiermodellen bestätigt werden, und im eigenen Laboratorium konnten wir zeigen, dass sich wache Ratten, die mit Poly I-C behandelt wurden, in einem Wohnlabyrinth während mehr als 24 Stunden viel weniger bewegten als normal, also deutliche Zeichen einer Beruhigung zeigten. Poly I-C ist eine hochmolekulare synthetische Ribonukleinsäure, die die Eigenschaft hat, im Körper der Tiere während mehr als 24 Stunden Interferon freizusetzen. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich somit, dass bei geeigneter Versuchsanordnung gewisse, auf biologischen Reaktionen beruhende Nebenwirkungen von Interferonen im Experiment erfasst werden können.

Die hier kurz geschilderten Beobachtungen beim Menschen und in Tierexperimenten sind Teil eines zur Zeit in voller Entwicklung befindlichen Erkenntniswandels. Man hat jetzt festgestellt, dass das Immunsystem, das in erster Linie der Abwehr fremder Eindringlinge in den Körper dient, intensive Beziehungen mit dem Nervensystem unterhält (N. Dafny et al., 1985; J. Cavagnaro, 1986). Um die Verbindungen zwischen den zwei so unterschiedlich gebauten und organisierten Systemen zu ermöglichen, benützt das Immunsystem die Zytokine. Diese von Immunzellen hergestellten Überträgersubstanzen wirken, wie man jetzt weiss, nicht nur auf andere Zellelemente des Immunsystems, sondern können auch das Nervensystem nachhaltig beeinflussen. Es ist deshalb wohl verständlich, dass die hochaktiven Zytokine, wenn sie nicht am normalen Ort und in winzigen Mengen ganz gezielt freigesetzt werden, sondern zu therapeutischen Zwecken in grossen Dosen von aussen in die Blutbahn gespritzt werden, nicht nur die Immunzellen zu stärkerer Aktivität gegen Infektionserreger und Tumorzellen anregen, sondern auch das subtile Verbindungsnetz zum empfindlichen Nervensystem durcheinanderbringen (G. Zbinden, 1990b). Die psychischen Störungen sind deshalb ein Preis, den der Patient für die erwünschten Wirkungen gegen seine Krankheit in Kauf nehmen muss.

Für das nähere Studium der Interaktionen von Zytokinen mit dem Nervensystem sind Versuche am lebenden Tier allein nicht ausreichend. Besonders wenn es sich um diskrete Wirkungen handelt, die auf molekularer Ebene stattfinden, kann man nicht erwarten, dass deutliche, von aussen feststellbare Veränderungen des Verhaltensmusters auftreten. Für derartige Untersuchungen drängt sich deshalb die In-vitro-Methodik geradezu auf. Es ist heute möglich, Hirngewebe von Tieren in Kulturschalen zu züchten und die Funktion der Nervenzellen, z.B. durch Ableitung von elektrischen Potentialen, zu messen. Bei derartigen Versu-

chen, die auch im Hirnforschungsinstitut der Universität Zürich durchgeführt werden, konnte gezeigt werden, dass Interferone einen nachhaltigen Einfluss auf Nervenzellen ausüben. Es kommt meistens zu einer sehr intensiven und lang anhaltenden erhöhten Erregbarkeit der Zellen, was sich in einer verstärkten elektrischen Aktivität, die bis zu epilepsieähnlichen Krampfpotentialen gehen kann, äussert (M.C. Calvet and I. Gresser, 1979). Gleichartige elektrophysiologische Reaktionen konnten bei narkotisierten Ratten durch direkte Injektion der Interferone in Nervenzellen des Gehirns ausgelöst werden (C. Reyes-Vazques et al., 1984).

Diese Beobachtungen stehen nur scheinbar im Gegensatz zu den psychischen Störungen (Müdigkeit, Schläfrigkeit, usw.), die man bei Interferon-behandelten Patienten beobachtete. Es könnte ja sein, dass die Zytokine beim Menschen bevorzugt hemmende Nervenzellen stimulieren, was zu einer Herabsetzung der Aktivität der von diesen Zellen beeinflussten Nervenzentren und damit zu einer Dämpfung gewisser Funktionen führen würde. Anderseits wurde kürzlich festgestellt, dass auch bei Patienten nach Interferongabe eine erhöhte Erregbarkeit gewisser Hirnzentren festzustellen ist. Das konnte durch eine Aktivierung evozierter Potentiale nachgewiesen werden. Bei diesem klinischen Test werden Patienten Licht- oder Tonreizen ausgesetzt, und die Reaktion des Gehirns wird durch Messung der dadurch ausgelösten Hirnstromwellen gemessen. In vielen Fällen konnte bei dieser Versuchsanordnung nach Gabe von Interferon eine deutlich verkürzte Reaktionszeit festgestellt werden, was auf eine Aktivierung oder erhöhte Reizbeantwortung von Nervenzellen hindeutet (J. Born et al., 1989).



6 Ausblick

Die Entwicklung der Gentechnolo[illegible] ermöglicht, biologisch wichtige Wirksubstanzen und Strukturelem[illegible] Rezeptoren), die normalerweise vom [illegible]hen Organismus [illegible]estellt werden, in beträchtlichen Meng[illegible]iner Form zu [illegible] Dadurch werden bisher ungeahnte [illegible]eiten eröffne[illegible]kunft werden Chemiker versuchen, [illegible]n, in der Hoffnung, die Wirksamkeit [illegible]rn und die unerwünschten Eigenschaf- [illegible]rden aber auch als [illegible] [illegible] Organsysteme zu [illegible] [illegible]onen interagieren, zu [illegible] [illegible]en die biotechnologisch hergestellten [illegible] [illegible]onventionellen [illegible] [illegible]eue Testverfahren [illegible] [illegible]cher Sicht ist die Tatsache, dass [illegible] [illegible]wehrreaktionen gegen [illegible] [illegible]stier die toxikologischen Studien [illegible]

relativ kurzer Zeit durchgeführt werden können. Um aber doch Hinweise auf Gefahren bei Langzeittherapie zu erhalten, müssen neue Ideen zum Tragen kommen. Ein Vorschlag ist, für die Untersuchung der Langzeittoxikologie ein besonderes Präparat herzustellen, das von der gewählten Tierart normalerweise selbst produziert wird. Man würde beispielsweise für einen Langzeitversuch mit γ- Interferon an der Maus das normale Mäuseinterferon verwenden, das sich chemisch und wahrscheinlich auch biologisch vom entsprechenden Produkt des Menschen unterscheidet. Wie repräsentativ die dabei erhobenen Befunde für die Langzeitverträglichkeit von menschlichem γ-Interferon beim Menschen sind, ist noch nicht abgeklärt. Es ist aber sicher, dass der technische und finanzielle Aufwand der toxikologischen Prüfungen durch derartige Untersuchungen gewaltig vergrössert wird.

Eine noch weitergehende Verfeinerung des Verfahrens könnte erreicht werden, wenn man das menschliche Gen in die Versuchstiere überträgt (transgene Tiere). Die Tiere würden dann das menschliche Genprodukt, also das zur Prüfung anstehende menschliche Arzneimittel, selbst produzieren. Obwohl dies mit den heutigen Methoden der Biologie machbar ist, bestehen manche wissenschaftliche Einwände gegen die generelle Einführung dieser Technik.

Wie bei allen Fragen der Sicherheitsprüfung von Arzneimitteln sind auch bei den Biotechnologieprodukten die Anforderungen der Gesundheitsbehörden in Rechnung zu ziehen. Zu Beginn der Entwicklung haben sich viele Behörden damit recht schwer getan und haben gehofft, man könnte für diese Substanzen die altbewährten Testverfahren verwenden, wie sie für gewöhnliche Arzneimittel zur Verfügung stehen. Man hat auch versucht, Prüfvorschriften zu erlassen, bevor man sich über die besonderen Probleme der neuen Substanzklassen im klaren war. In den letzten Jahren hat aber auch hier ein Umdenken stattgefunden. Die Behörden haben eingesehen, dass starre Prüfvorschriften nichts bringen, und haben sich darauf beschränkt, allgemeine Richtlinien zu erlassen und darauf hinzuweisen, dass für jedes Biotechnologieprodukt seine besonderen chemischen und biologischen Eigenschaften beachtet werden müssen (CPMP 1988; A. Kawahara, 1990). Die kommenden Jahre werden zeigen, ob durch die weitere Forschung über biotechnologische Verfahren nicht nur wirksamere, sondern auch sichere neue Arzneimittel entwickelt werden können.

7 Literatur

Alder, S., and Zbinden, G. (1988) National and international drug safety guidelines. M.T.C. Verlag. Zollikon.

Anderson, T. D., and Hayes, T. J. (1989) Toxicity of human recombinant interleukin-2 in rats. Pathologic changes are characterized by marked lymphocytic and eosinophilic proliferation and multisystem involvement. Lab. Invest. *60*: 331–345.

Anderson, T. D., Hayes, T. J., Gately, M. K., Bontempo, J. M., Stern, L. L., and Truitt, G. A. (1988) Toxicity of human recombinant interleukin-2 in the mouse is mediated by interleukin-activated lymphocytes. Separation of efficacy and toxicity by selective lymphocyte subset depletion. Lab. Invest. *59*: 598–612.

Born, J., Späth-Schwalbe, E., Pietrowsky, R., Porzolt, F., and Fehm, H. L. (1989) Neurophysiological effects of recombinant interferon-gamma and -alpha in man. Clin. Physiol. Biochem. *7:* 119–127.

Calvet, M. C., and Gresser, I. (1979) Interferon enhances the excitability of cultured neurones. Nature *278:* 558–560.

Cavagnaro, J. (1986) Molecular basis for the bidirectional modulation of the neuroendocrine and immune systems. The Year in Immunology *2:* 303–322.

CPMP (1988) Committee for Proprietary Medicinal Products. Ad hoc working party on biotechnology/pharmacy. Working party on safety of medicines. Notes to applicants for marketing authorizations on the pre-clinical biological safety testing of medicinal products derived from biotechnology (and comparable products derived from chemical synthesis). Commission of the European Communities, Brussels (Rev. 5).

Dafny, N., Prieto-Gomez, B., and Reyes-Vazquez, C. (1985) Does the immune system communicate with the central nervous system? Interferon modifies central nervous action. J. Neuroimm. *9:* 1–12.

Dinarello, C. A., Bernheim, H. A., Duff, G. W., Le, H. V., Nagabhushan, T. L., Hamilton, N. C., and Coceani, F. J. (1984) Mechanism of fever induced by recombinant interferon. J. Clin. Invest. *74:* 906–913.

Fent, K., and Zbinden, G. (1987) Toxicity of interferon and interleukin. TIPS *8:* 100–105.

Kawahara, A. (1990) Regulatory aspects of biotechnology in Japan. Drug Inform. J. *24:* 141–152.

Kirchner, H. (1984) Interferons, a group of multiple lymphokines. Springer Seminars in Immunopathology *7:* 347–374.

Krueger, J. M. (1990) Somnogenic activity of immune response modifiers. TIPS *11:* 122–126.

Mizel, S. B. (1989) The interleukins. FASEB J. *3:* 2379–2388.

Reyes-Vazquez C., Prieto-Gomez, B., Georgiades, J. A., and Dafny, N. (1984) Alpha and gamma interferons' effects on cortical and hippocampal neurons: single cell recording. Intern. J. Neuroscience *25:* 113–121.

Schellekens, H., Van Eerd, P. M. C. A., de Reus, A., Weck, P. K., and Stebbing, N. (1982) Antiviral and side effects of interferons produced by recombinant DNA techniques as tested in Rhesus monkeys. Antiviral Research *2:* 313–318.

Smalley, R. V., and Borden, E. C. (1986) Interferons: current status and future directions of this protypic biological. Springer Seminars in Immunology *9:* 73–83.

Takano (1987) In: General discussion on biosynthetic human growth hormone. Pediat. adolesc. Endocrin. *16:* 227–228.

Teelmann, K., Hohbach, C., Lehmann, H., and the International Working group (1986) Preclinical safety testing of species-specific proteins produced with recombinant DNA-techniques. Arch. Toxicol. *59:* 195–200.

Weissinger, J. (1989) Nonclinical pharmacologic and toxicologic considerations for evaluating biologic products. Regulat. Toxicol. Pharmacol. *10:* 255–263.

Williams, B. R. G. (1988) Molecular mechanisms of interferon action. In: R. A. Smith, ed. Interferon Treatment of Neurologic Disorders. Marcel Dekker, Inc. New York and Basel, pp. 43–63.

Zbinden, G. (1985) Menschen, Tiere und Chemie, MTC Verlag, Zollikon.

Zbinden, G. (1990a) Safety evaluation of biotechnology products. Drug Safety *5* (Suppl. 1): 58–64.

Zbinden, G. (1990b) Toxicity of interferons and interleukins in the central nervous system. Proc. 6th Internat. Symposium on Neuronal Control of Bodily Function: Basic and Clinical Aspects. R. C. A. Fredrickson, J. L. McGaugh, and D. L. Felden eds. Hogrefe & Huber Publ. Toronto, in press.

Prof. Dr. G. Zbinden, Institut für Toxikologie der ETH und der Universität Zürich, CH-8603 Schwerzenbach.

Nekrolog

Res Jost (1918–1990)

Am 3. Oktober 1990 verstarb in Zürich Res Jost, Professor für theoretische Physik an der ETH von 1955–83, dessen Arbeiten zur quantenmechanischen Streutheorie und zur relativistischen Quantenfeldtheorie heute Allgemeingut der theoretischen Physik sind. Res Jost war ein Schüler von Gregor Wentzel und begann seine wissenschaftliche Laufbahn mit Stationen am Niels Bohr Institut in Kopenhagen, an der ETH als Assistent von Wolfgang Pauli und am IAS in Princeton. In diese Jahre fallen bedeutende Beiträge zur Quantenelektrodynamik, so etwa die Berechnung der Vakuumpolarisation in vierter Ordnung (1950, mit J. M. Luttinger). Seinen Ruf als mathematischer Physiker begründete Jost durch die Arbeiten zum quantenmechanischen Streuproblem. Die Potentialstreuung dient ihm dabei als Modell, die S-Matrix-Theorie von Heisenberg und Kramers kritisch zu prüfen. Schon in der ersten Arbeit wird 1947 die später nach ihm benannte Jost-Funktion als Hauptwerkzeug eingeführt. Im Zentrum steht das Umkehrproblem: die Bestimmung des Potentials aus der Kenntnis einer Streuphase (für alle Energien) und der Energie-Eigenwerte zum gleichen Drehimpuls. Nach klärenden Beispielen von V. Bargmann wird dieses Problem in drei grundlegenden Arbeiten von R. Jost und W. Kohn (1952–53) vollständig gelöst – zuerst mit einem eigenen konstruktiven Verfahren, später auf der Basis der inzwischen bekannt gewordenen Theorie von I.M. Gelfand und B.M. Levitan. Die dabei aufgedeckte Vielfalt äquivalenter Potentiale hat 15 Jahre später bei der Lösung der nicht-linearen Korteweg-de Vries Gleichung zu überraschenden neuen Einsichten geführt. 1957 folgen zwei klassische Beiträge von Jost auf dem Gebiet der allgemeinen Quantenfeldtheorie. Das von G. Lüders und W. Pauli störungstheoretisch begründete CTP-Theorem wird in unübertroffener Eleganz und mathematischer Strenge hergeleitet: in einer relativistischen Quantenmechanik mit positiver Metrik und Energie ist die Existenz einer antiunitären diskreten Symmetrie, die bei separater Gültigkeit von Ladungskonjugation und Zeit- und Raumspiegelung dem Produkt CTP entspricht, einer schwachen Form der Lokalität äquivalent. Diese Arbeit zeigt deutlich, auf wieviel Struktur eine Theorie der subatomaren Prozesse verzichten müsste, wenn diese einzigartige Symmetrie gebrochen wäre. Auch in den heutigen nicht-abelschen Eichfeld-Theorien muss CTP für die physikalischen Teilchen gelten. In der zweiten Arbeit mit H. Lehmann (und weitergeführt von F.J. Dyson) über die Integral-Darstellung kausaler Kommutatoren konnten Lorentz-Invarianz, Spektrumsbedingungen und Lokalität einer Quantenfeldtheorie in einer sehr kompakten Form zusammengefasst werden. Damit ergaben sich Beweise der Dispersionsrelationen, die schliesslich durch Experimente von S.J. Lindenbaum et al. getestet werden konnten. Jost machte sein tiefes Verständnis der Grundlagen der relativistischen Quantenfeldtheorie den folgenden Theoretiker-Generationen durch eine wunderschöne Monographie "The General Theory of Quantized Fields" zugänglich. Nicht selten sah er seine Aufgabe darin, leichtgewichtige Vermutungen durch verallgemeinerungsfähige Gegenbeispiele zu widerlegen, wie etwa 1958 im «Beispiel zum Nukleon-Vertex». Sein unbestechliches Urteil hat viele seiner Schüler geprägt.

K. Hepp, W. Hunziker

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/1: 67–68

Jugendpreis der Naturforschenden Gesellschaft Zürich

Horst Dargel, Zürich

1996 feiert die NGZ als älteste schweizerische Gesellschaft dieser Art ihr 250jähriges Bestehen. Der naheliegende Rückblick auf die lange vielfältige Tätigkeit und die Besinnung auf eine wirkungsvolle Tradition regte den Vorstand an, eine frühe Gepflogenheit, die Zuwendung zur Zürcher Jugend, wieder aufleben zu lassen. Wurden noch im vergangenen Jahrhundert die Neujahrsblätter der NGZ der Jugend gewidmet, so soll jetzt, im Jahrzehnt der 250-Jahrfeier, zeitgemäss und dem grossen Anlass entsprechend, eine jährliche Preisverleihung für hervorragende naturwissenschaftliche Arbeiten Jugendlicher stattfinden und anregend wirken.

Preisträger 1990

Christian Busenhart
Hadlaubstrasse 82
8006 Zürich

Simon Wyss
Heinrich-Federer-Strasse 5
8038 Zürich

Laudatio

Der von der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich für besondere naturwissenschaftliche Arbeiten der Zürcher Jugend gestiftete Preis von Fr. 500.– wurde 1990 Christian Busenhart und Simon Wyss, Klasse 7 d des Realgymnasiums Rämibühl der Kantonsschule Zürichberg für ihre gemeinsame Semesterarbeit «CHAOS IN DER MATHEMATIK» zuerkannt, insbesondere für die geschickte Erfassung und hervorragende Darstellung dieses Themas mit modernen Mitteln.

Zürich, 14. September 1990 — Naturforschende Gesellschaft in Zürich

Inhaltsangaben zur Preisarbeit

Angeregt durch die Lektüre des Buches von Douglas R. Hofstadter «Gödel, Escher, Bach – ein endloses geflochtenes Band» und durch das Studium von Texten zum Thema «Chaos und Ordnung» im Lateinunterricht beabsichtigen Christian Busenhart und Simon Wyss zunächst in ihrer Semesterarbeit (obligatorische Halbjahresarbeit im Realgymnasium zu selbstgewähltem Thema) «Rekursionen» daraufhin zu untersuchen. Da sich rekursive Prozesse sehr gut mit Hilfe von Computer-Graphiken darstellen lassen, kam ihnen bald die Idee, entsprechende Computerprogramme zu schreiben und die entstehenden Bilder in einem Videofilm festzuhalten. Zunächst galt es, eine Computersprache zu finden, die einerseits rekursive Berechnungen ermöglicht und anderseits auch über gute Graphikprozeduren verfügt. Christian und Simon wählten die Programmiersprache ‹Modula 2›, die sie zuerst erlernen mussten. Unter grossem Zeitaufwand wurden die Programme geschrieben, getestet und korrigiert, um schliesslich auf der Computeranlage der Schule für Gestaltung Zürich (Kunstgewerbeschule) einen Videofilm von ca. 19 Minuten Länge herstellen zu können.
Der Film beginnt mit Bildern von Labyrinthen aus der Antike und geht der Frage nach, wieso diese so verwirrend sind. Anschliessend wird gezeigt, wie eine Strecke durch fortgesetztes Anwenden eines Generators zerknittert werden kann und ihre Länge so bis ins Unendliche wächst. Unter dem Titel «Regeln für die Katastrophe» wird gezeigt, warum die Population eines Lebewesens unter bestimmten Bedingungen ins Chaos stürzen kann. Nach Untersuchungen in der komplexen Zahlenebene und hervorragenden Bildern von Mandelbrot- und Julia-mengen endet der Film mit der Darstellung von Farnblättern und der Frage, ob in Zukunft Verfahren zu finden sind, die es erlauben, Millionen von Bildpunkten auf wenige Formeln und Koeffizienten zu reduzieren.
Die Computer-Graphiken des Films weisen nahezu professionellen Standard auf. Die Vertonung ist mit viel Liebe zum Detail ebenfalls gelungen.

Referent des Jugendpreises ist der Vertreter der Zürcher Mittelschulen im Vorstand der NGZ:
Prof. Horst Dargel, Im Ahorn 15, 8125 Zollikerberg, Tel. 01/391 68 89

.besprechungen

ırckhardt: Die Symmetrie der Kristalle, : einem Beitrag von E. Scholz. 208 Sei-, 64 Abbildungen, Birkhäuser Verlag !8, gebunden Fr. 58.–.

r Autor zeigt, wie sich die Kenntnis von mmetrie der Kristalle seit ihren Anfän-n die Zeit der Französischen Revolution kelte. Das Buch besteht aus 2 Teilen. Der «Von Haüy zu Laue», zeigt die Entwick-on den Anfängen aufgrund von Beobach-ı der äusseren Form der Kristalle bis zur iven Klärung des Kristallbaus aufgrund aues Arbeiten über die Beugung von ɛnstrahlen an Kristallen. Der zweite Teil, kristallographische Schule in Zürich», Aspekte der weiteren Entwicklung an-ler Beiträge von Paul Niggli und seinen ɛrn. Zu diesen Schülern zählt auch der des Buches, auch wenn er aus Beschei-t seine Beiträge nur am Rande erwähnt. !uch «Die Bewegungsgruppen der Kri-raphie» ist seit seinem Erscheinen vor 44 ein viel zitiertes Standardwerk geblie-ɛit vielen Jahren gilt das besondere Inter-von Prof. Burckhardt nun wissen-ɜgeschichtlichen Studien zur Mathematik ristallographie mit besonderer Berück-ung schweizerischer Beiträge. Der Autor : somit aus dem vollen schöpfen, als er r ihm gewohnten Sorgfalt diese Synthese historischen Untersuchungen schrieb.

r französische Mineraloge R.-J. Haüy -1826) beobachtete, dass Kalzitkristalle, fallen liess, in rhomboedrische Bruch-aufspalteten, und schloss daraus auf den u der Kristalle aus einfach geformten en Einheiten. Er bestimmte die Abstände ıen dem Ursprung eines geeignet gewähl-oordinatensystems und den Punkten, in eine Kristallfläche die Koordinatenach-ınitt, und bemerkte, dass die Verhältnisse Abstände für verschiedene Flächen des-Kristalls sich immer als Bruch mit klei-ɛrten von Zähler und Nenner ausdrücken Gesetz der rationalen Indizes). Ausser-.nd er in vielen Mineralien, dass Flächen en, die sich völlig gleichartig verhielten ıetriegesetz). Die Weiterentwicklung Erkenntnis bildet den roten Faden, dem ch folgt.

Diese Entwicklung führte im Laufe des 19. Jahrhunderts zur Bestimmung der 230 Raumgruppen. Diese stellen die möglichen geometrischen Symmetrien von Kristallen, d.h. von 3fach periodischen Anordnungen von Atomen, dar. Lässt man die translativen Anteile der Symmetrieabbildungen weg, so erhält man die Einteilung der Raumgruppen in 32 Kristallklassen. Diese werden in 7 Kristallsysteme eingeteilt, indem diejenigen Kristallklassen, die mit denselben der 14 Gittertypen (Bravaisklassen) vereinbar sind, demselben System zugeordnet werden.

Historisch gesehen wurden zuerst die 7 Kristallsysteme gefunden, und zwar 1815 von Ch.S. Weiss, einem Schüler von Haüy. Als nächstes zeigte M.L. Frankenheim, 1826 und, unabhängig von ihm, J.F.C. Hessel 1830, dass jeder Kristall aufgrund seiner Symmetrie einer von 32 Klassen zugeordnet werden kann, eine Entdeckung, die lange unbeachtet blieb. Erst nach über 60 Jahren machte L. Sohnke auf die Arbeit von Hessel aufmerksam und nach über 150 Jahren J.J. Burckhardt auf die Priorität von Frankenheim! Dieser fand 1835 auch die 14 Gittertypen. 1876 fand L. Sohnke bei der Untersuchung regulärer Punktsysteme die 65 Raumgruppen, die von translativen Anteilen abgesehen nur reine Drehungen enthalten, also keine Spiegelungen oder Drehspiegelungen. 1890 publizierte der Russe E.S. Fedorov und 1891 der Deutsche A.S. Schoenflies Listen der 230 Raumgruppen.

Die Darstellung der Arbeiten von Fedorov und Schoenflies sowie ein anschliessender Überblick über spätere Entwicklungen wurden von E. Scholz geschrieben unter Verwendung moderner mathematischer Terminologie. Im letzten Kapitel des ersten Teils berichtet Burckhardt von der Entdeckung der Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen durch M. Laue im Jahre 1912. Diese Entdeckung bildete eine tiefgreifende Zäsur in der Geschichte der Kristallographie, da der Aufbau der Kristalle aus periodisch angeordneten Atomen bisher lediglich eine Hypothese darstellte, von nun an jedoch experimenteller Bestimmung zugänglich wurde.

Im zweiten, der kristallographischen Schule in Zürich gewidmeten Teil werden Beiträge von Paul Niggli (1888–1953) und seinen Schülern dargestellt. In seinem berühmten Jugendwerk «Geometrische Kristallographie des Diskontinuums» erweiterte Niggli 1919 die Re-

sultate von Schoenflies, um zu zeigen, wie Röntgenaufnahmen eines Kristalls zur Bestimmung seiner Raumgruppe verwendet werden können. Der Autor berichtet auch über Nigglis Herleitung der 31 Typen 2fach periodischer Lagerungen kongruenter Kreise in der Ebene, bei denen jeder Kreis gleich viele andere berührt, und wie Niggli die mathematische Theorie der reduzierten quadratischen Formen für die Kristallographie nutzbar machte, um die Beschreibung der Kristallgitter durch 3 Vektoren zu normieren.

W. Nowacki, später Professor in Bern, erweiterte Nigglis Arbeiten über Kreislagerungen auf Ellipsen. F. Laves zeigte, dass es 11 Typen homogener Netze gibt, d.h. 11 Arten der lückenlosen Überdeckung der Ebene durch gleiche oder spiegelbildlich gleiche Polygone, wobei jedes Polygon in gleicher oder spiegelbildlich gleicher Weise umgeben ist. H. Heesch gab erstmals ein Beispiel für ein Polygon, mit dem die Ebene zwar lückenlos überdeckt werden kann, mit dem aber keine Überdeckung möglich ist, bei der die Polygone durch eine Bewegungsgruppe auseinander hervorgehen.

P. Nigglis Illustration der 7 Streifenornamente (1dimensionalen Raumgruppen) regten den Mathematiker A. Speiser an der Universität Zürich zur Herleitung der 31 Typen von Ornamenten des 2seitigen Streifens an. Die 17 Ebenengruppen (2dimensionalen Raumgruppen) wurden zwar schon 1891 von Fedorov angegeben, aber erst durch die schön illustrierte Arbeit des ETH-Mathematikers G. Polya aus dem Jahr 1924 in weiteren Kreisen bekannt. (Der bekannte holländische Graphiker M.C. Escher z.B. hat Polyas Figuren von Hand kopiert und aus ihnen reiche Anregung geschöpft.) 1929 erschienen gleich 4 Arbeiten, in denen die 80 Typen 2seitiger Ornamente hergeleitet wurden. Zwei davon stammten aus der Zürcher Schule: eine von H. Heesch, die andere von L. Weber, der Konservator der mineralogischen Sammlung in Zürich und gleichzeitig Professor in Fribourg war.

Das Buch ist reich illustriert mit Porträts der erwähnten Forscher und mit Figuren aus ihren Arbeiten. Im heutigen Zeitpunkt, wo die Strukturbestimmung mittels Röntgenbeugung auf vielen Gebieten entscheidende Beiträge liefert, [illegible]n es biologisch wichtige Moleküle, synthe[illegible]e Zeolithe, Hochtemperatursupraleiter [illegible] Quasikristalle mit 5zähliger Symmetrie, [illegible] es besonders reizvoll, auch einen Blick auf die Entwicklung dieser lebendigen, interdisziplinären Wissenschaft zu werfen. Wir sind Herrn Burckhardt dankbar, dass er uns dies auf anregende Weise ermöglicht mit besonderer Berücksichtigung der Zürcher Schule, die nicht nur in der Vergangenheit Grosses leistete, sondern auch heute in den obengenannten aktuellen Gebieten mit an vorderster Front steht.

Hans Grimmer

Laura Sigg und Werner Stumm: Aquatische Chemie, eine Einführung in die Chemie wässeriger Lösungen und in die Chemie natürlicher Gewässer. Verlag der Fachvereine, ETH Zürich, 1989, 396 Seiten, Fr. 46.–.

Das Buch wurde als Scriptum für Vorlesungen in aquatischer Chemie im Rahmen des Studienganges Umwelt- und Naturwissenschaften ausgearbeitet. Es richtet sich dementsprechend an Praktiker und breit an Umweltfragen interessierte Studenten und Forscher und nicht an Spezialisten in der Gewässerkunde.

Die Autoren, welche in der EAWAG beheimatet sind, können wohl zu den in Europa wesentlichen Spezialisten im Bereich der Wasserchemie gezählt werden. Dementsprechend basiert das Buch auf langjähriger eigener Arbeit auf diesem Gebiet. Die im Text aufgeführten Beispiele stammen oft aus der eigenen Küche, und auch die theoretischen Hintergründe sind von den gleichen Autoren schon in anderen Zusammenhängen aufgearbeitet und publiziert worden.

Das Buch als vereinfachte deutschsprachige Zusammenfassung des Standardwerkes «Aquatic Chemistry: an Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters» von Werner Stumm und James Morgan zu bezeichnen, wäre aber verfehlt. Obwohl es sich in vielen Teilen an diesen Text anlehnt, sind wesentliche Abweichungen zu verzeichnen. So z.B. ist das Kapitel über Thermodynamik und Kinetik anwendungsorientiert gehalten und steht nicht mehr am Anfang des Buches als (abschreckender?) theoretischer Einstieg. Ein neues Kapitel über die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Wasser ist eingefügt worden, das insbesondere die Erkenntnisse der letzten Jahre vorstellt und diskutiert.

Der vorliegende Text ist in seinem Aufbau den Bedürfnissen der Studenten angepasst. Dies lässt sich auch daraus ersehen, dass im

Anschluss an jedes Kapitel Übungsaufgaben zusammengestellt sind.

Das erste Kapitel gibt eine Übersicht über die chemische Zusammensetzung natürlicher Wässer und beinhaltet eine gut gewählte Zusammenstellung von Tabellen, welche im Verlauf des Textstudiums benötigt werden. Speziell dieses Kapitel gewährt, zusammen mit der auf das Wesentliche beschränkten Literaturliste, einen guten und faszinierenden Einstieg in das Thema. Die folgenden Kapitel, die alle einen Umfang von je ca. 30–40 Seiten haben, sind einzelnen Themen wie z.B. Säuren und Basen, Carbonatgleichgewicht, Fällung und Auflösung usw. gewidmet. Sie können als selbständige Kapitel betrachtet und mehr oder weniger unabhängig voneinander gelesen werden. Obwohl die logische Abfolge der Kapitel einleuchtet, wird klar, dass die einzelnen Themen so komplex miteinander verknüpft sind, dass ein Hin- und Herblättern zwischen den Kapiteln unerlässlich ist und die Kapitelabfolge, je nach Bedürfnissen des Lesers, auch anders aussehen könnte. Der Schwierigkeitsgrad des Buches ist in den verschiedenen Kapiteln sehr unterschiedlich. Es gibt Kapitel, z.B. jenes über Säuren und Basen, die als Einführung in das entsprechende Stoffgebiet bezeichnet werden können. Andere sind sehr detailliert ausgeführt und dürften für den Nicht-Spezialisten nicht einfach verständlich sein. So schreiben die Autoren selbst, dass eine einführende Vorlesung in allgemeiner und physikalischer Chemie für die Lektüre vorausgesetzt wird.

Das Buch beinhaltet eine grosse Fülle von theoretischen Hintergründen und von Fakten, die es auch als Nachschlagewerk für den Praktiker geeignet machen. Es gibt im deutschsprachigen Raum kein vergleichbares Buch, das in entsprechender Breite und gleichzeitig Tiefe das Thema Wasser so abhandelt wie das vorliegende.

Es ist deshalb ein Muss für Studenten, Fachleute und Praktiker, die sich mit dem Thema Wasser und seiner Chemie auseinandersetzen müssen.

Jürg Hertz

Stefanie Jacomet, Christoph Brombacher und Martin Dick: Archäobotanik am Zürichsee – Ackerbau, Sammelwirtschaft und Umwelt von neolithischen und bronzezeitlichen Seeufersiedlungen *im Raum Zürich* – Ergebnisse von Untersuchungen pflanzlicher Makroreste der Jahre 1979–1988. Berichte der Zürcher Denkmalpflege, Monographien 7. Orell Füssli Verlag Zürich, 1989. 348 S., 85 Abbildungen, 98 Tabellen und 20 Tafeln (davon 5 farbig). Preis Fr. 129.–.

Archäobotanik untersucht die Beziehungen des ur- und frühgeschichtlichen Menschen zu seiner pflanzlichen Umwelt. Begründet wurde dieses Teilgebiet der Archäologie vom Zürcher Paläontologen Oswald Heer 1865 mit seinem Werk «Die Pflanzen der Pfahlbauten». Erst in den letzten Jahrzehnten hat diese Forschung auch in der Schweiz wieder neuen Aufschwung erhalten, parallel mit der Entwicklung neuer Grabungstechniken, welche insbesondere eine quantitative Auswertung ermöglichen.

Das vorliegende Werk bringt nun die Ergebnisse mehrerer Ausgrabungen auf dem Gebiet der Stadt Zürich zwischen 1979 und 1984 (unter anderem der vielbeachteten Tauchgrabung «Kleiner Hafner» vor dem Bellevue).

Das Buch ist gegliedert in Einführung, Methodik, Ergebnisse zur Landschaftsgeschichte und zur Wirtschaftsarchäologie: Vom Siedlungs- und Nutzungsraum über den Anbau und das Sammeln von Nutzpflanzen bis hin zu einem Jahreskalender der landwirtschaftlichen Tätigkeiten in einem jungsteinzeitlichen Dorf. Der wissenschaftliche Anhang mit Literaturverzeichnis, Glossar, Fundverzeichnis und einem Katalog mit detaillierter Beschreibung der Funde, Hinweisen auf kritische Gruppen und Hilfsmitteln für deren Bestimmung sowie reichem Tafelwerk mit sorgfältigen Zeichnungen und Fotografien runden das Werk ab zu einem umfassenden Bericht über den gegenwärtigen Stand der archäobotanischen Forschung in der Schweiz. Der untersuchte Zeitraum umfasst mehr als dreieinhalb Jahrtausende bäuerlicher Geschichte und reicht von deren frühesten Anfängen auf schweizerischem Gebiet, der Egolzwiler Kultur um 4300 v. Chr., bis in die Spätbronzezeit um 1000 v. Chr.

Für den Archäologen muss schon die schiere Masse an Daten ein Geschenk sein. Zudem erhält er wertvolle methodische Hinweise für die Planung zukünftiger Ausgrabungen, welche eine repräsentative Erfassung der zeitlichen Veränderung ökonomischer Gegebenheiten erlauben. Die für die weitere Forschung wichtigen Resultate sind in Tabellen und Grafiken übersichtlich aufgearbeitet. Von allgemeinem

Interesse ist sicherlich die Entwicklung quantitativer Modelle aus diesen Daten, eigentliche Versuche zur Rekonstruktion der ökologischen und ökonomischen Verhältnisse in der neolithischen Gesellschaft. Darin werden auch Erkenntnisse aus verschiedenen anderen Fachgebieten wie Ökonomie, Ethnologie, Ernährungswissenschaften verarbeitet.

Schon ein flüchtiges Eintauchen in die vorsichtig und sorgfältig ausgebreiteten Argumentationsnetze zeigt die Stärke der angewandten Methode. Ein Beispiel: Saatweizen wird im Fundgut aus zeitlich aufeinanderfolgenden Kulturen des Neolithikums zunehmend vom Emmer verdrängt. Aus einer Palette von möglichen Ursachen erscheint eine verminderte Bodenqualität als wahrscheinlichste Erklärung, u. a. aufgrund von parallel feststellbaren Veränderungen im Spektrum der begleitenden Unkrautarten. Im Zusammenhang mit einer weiteren Argumentationskette, welche intensivere Bodenbearbeitungsmethoden wahrscheinlich macht, wird auf eine wesentliche Zunahme der Bevölkerungszahl im Spät- und Endneolithikum geschlossen. Zahlreiche Querverbindungen zu Resultaten aus anderen Ausgrabungen im Alpenvorland sowie Vergleiche mit theoretischen Modellen werden zur Erarbeitung dieser Aussage herangezogen. Die Argumentation bleibt dabei zu jedem Zeitpunkt transparent und damit diskutierbar. Klar, dass die Schlussfolgerungen im Zuge kommender Untersuchungen auf ihre Tragfähigkeit weiter geprüft werden müssen. Die Erörterung von Entwicklungstendenzen etwa hätte da und dort mit statistischen Signifikanztests gegen die Gefahr der Überinterpretation abgesichert werden können. Schon so liefert das Buch aber einen interessanten Beitrag zur aktuellen gesellschaftlichen Diskussion über das Wirken des Menschen im Spannungsfeld zwischen aktiver Veränderung seiner Umwelt und Anpassung an sie.

Anlass zu Kritik bietet die Arbeit bei der Erörterung der Einwanderung von Arten in vom Menschen geschaffene Pflanzengesellschaften (für Botaniker ein ungemein spannendes Kapitel!). Um zu beurteilen, ob eine bestimmte Pflanzenart vor fünftausend Jahren bei uns heimisch war oder nicht, reicht es nicht aus, ihre aktuelle geographische Verbreitung in grobem [illegible]ster zu betrachten. Beispielsweise müssen [illegible]ten mit heute eurasiatischer Verbreitung [illegible]ht von vornherein schon damals in unserer [illegible]d heimisch gewesen sein, da es sich ja um Arten handelt, die erst durch das Wirken des Menschen einen Platz in unserer Vegetation gefunden haben könnten. Eine eingehende Diskussion wäre hier wünschenswert. Dennoch auch hier: Die gezogenen Schlüsse sind bemerkenswert, etwa die Tatsache, dass sich die für uns heute schützenswerten Ackerunkrautgesellschaften in ihrer oft farbenfrohen Zusammensetzung offenbar erst in der Römerzeit und im Mittelalter gebildet haben im Zusammenhang mit der Erschliessung von Verkehrswegen und dem damit aufblühenden Handel.

In Anbetracht seiner äusseren Aufmachung mag das Buch manch Bibliophilen zum Kauf verlocken. Es handelt sich aber um wissenschaftliche Primärliteratur und wendet sich an Fachleute, speziell Archäologen und Botaniker. Das gelungene Titelbild zeigt eine Ansicht des jungsteinzeitlichen Zürich. Es ist nicht allein der guten Laune einer inspirierten Künstlerin entsprungen, sondern witziger Synthese von wissenschaftlicher Präzision und künstlerischer Phantasie zu verdanken. Eine dem Forschungsstand angemessene Rekonstruktion. Der umfangreiche Text ist mit einem dezimalen Inhaltsverzeichnis zwar übersichtlich gegliedert (was über das fehlende Register hinwegtröstet). Die Suche nach Rosinen kann sich aber recht mühsam gestalten, da Textauszeichnungen wie Kursiv- oder Fettsatz äusserst sparsam eingesetzt worden sind und Abschnittsüberschriften überdies im Typen-Einerlei unterzugehen drohen.

Interessierte Leser seien weiter hingewiesen auf einen Artikel derselben Autoren im Katalog zur Ausstellung «Die ersten Bauern» des Schweizerischen Landesmuseums, der die Ergebnisse des vorliegenden Werks zusammenfassend und gut lesbar wiedergibt.

Christian Wagner

Hartmut Heinrichs und Albert Günter Herrmann: Praktikum der Analytischen Geochemie. 669 Seiten, 49 Abbildungen, 64 Tabellen. Springer-Verlag Berlin, 1990. – Preis DM 78.00.

Dieses neue Springer-Lehrbuch wendet sich an Geowissenschafter, Chemiker und Laboranten. Das Kompendium soll eine Informationsquelle für praxisbezogene Lehrveranstaltungen und für den täglichen Laborbetrieb sein, wobei nicht die systematische Literaturverarbeitung,

ı eigene, über Jahrzehnte gesammelte ıngen im Vordergrund stehen. Dieses ıt ist sehr positiv und stellt einen Vorzug ber blossen Rezeptsammlungen dar.

Buch gliedert sich in: Grundlagen 90), und: Analysenmethoden (S. 291– ann folgen kurze Kapitel über Kontami- Platingeräte, Erste Hilfe, und auch die gerechte Beseitigung von Laborabfäl- let Beachtung. Der Teil Analysenmetho- in zwei Abschnitte geteilt: Bestimmung ıuptelemente, und: Spektrometrische Elementbestimmung (hauptsächlich ›sorption). Bei den Hauptelementen meist zwei detaillierte Verfahrenswei- Wahl vorgelegt: Gravimetrie (Fällungs-) und Atomabsorption (in einigen Fällen ›ektralphotometrie oder Massanalyse). Hauptgewicht liegt somit auf Gravime- l Atomabsorption. Es erstaunt, dass so e und genaue Methoden wie die Kom- etrie (komplexometrische Titration) rwähnt werden. Demgegenüber finden te gravimetrische Verfahren ausführli- ıandlung. Dies mag den Anfänger auf ebiet der Gesteinsanalyse verwirren, d der praktische Analytiker im Buch von hs und Herrmann einen reichen Schatz ler Daten vorfindet.

ı Geochemiker möchte ich das Werk, Tradition der beiden Hochschulen Göt- ınd Clausthal weiterführt, sehr empfeh-

Max Weibel

chopfer: Experimentelle Pflanzenphy- ›gie, Band 2 Einführung in die Anwen- gen, Springer Verlag Berlin Heidelberg ı York, 1989, 458 Seiten, 47 Abbildun- DM 58.–

Buch Experimentelle Pflanzenphysio- : um einen weiteren Band erweitert wor- ch Band 1 Einführung in die Methoden ıun der Autor mit Band 2 Einführung in vendungen auf. In diesem 2. Band stellt chopfer insgesamt 156 pflanzenphysio- Experimente vor. Die Experimente 7 Kapiteln thematisch geordnet, in wel- a. pflanzenphysiologische Themen wie : von Pflanzenmaterial, Enzyme, Photo- e, Dissimilation, Translokation, Phyto- e, Photomorphogenes oder Regenera- ıandelt werden. Jedes der Kapitel wird durch einführende Vorbemerkungen eingeleitet. Anschliessend werden Demonstrationsexperimente angeführt, welche wichtige physiologische Sachverhalte veranschaulichen sollen. Die darauf anschliessenden analytischen Experimente sind fachlich anspruchsvoller und labortechnisch aufwendiger und zielen zur Lösung praktischer, teilweise neuer Aufgaben hin.

Alle Experimentbeschreibungen beginnen mit einer kurzen theoretischen Einführung und der Angabe, von weiterführender Spezialliteratur. Dann werden das benötigte Material und die Geräte aufgelistet und die Durchführung des Experiments beschrieben. Theoretische Grundlagen oder Versuchsanordnungen werden mit Abbildungen verdeutlicht. Es werden abschliessend Möglichkeiten zur Auswertung der erhaltenen Daten aufgezeigt und in Form von Fragen weitere Problemkreise angesprochen, welche zu Folge-Experimenten animieren sollen. Der Autor erhofft sich durch diese Anordnung, dass der Experimentator schrittweise von der nachvollziehenden Experimentierart zur aktiv fragenden, auf Problemlösung hinzielenden experimentellen Arbeitsweise hingeführt wird. Hinweise zu anderen Experimenten in diesem Buch oder zu Experimenten im 1. Band ermöglichen nützliche Quervergleiche.

Der Autor hat mit dem vorliegenden Buch einen wertvollen Beitrag für Unterricht und Praktika an Hochschulen und Gymnasien geschaffen. Es ist eine respektable Sammlung von pflanzenphysiologischen Experimenten entstanden, einerseits von klassischen Experimenten, andererseits von Experimenten, welche der Autor aus der Originalliteratur entnommen und erstmals in Form von Praktikumsversuchen bearbeitet hat. Die Stärke des Buches besteht in einer guten Durchmischung von rezeptiven Beschreibungen und informativer, das Interesse weckender Theorie. Das Buch bleibt trotz des Lehrbuchcharakters und der Fülle von Versuchsbeschreibungen gut leserlich. Je nach Kenntnisstand findet der Experimentator leichtere oder anspruchsvollere pflanzenphysiologische Experimente. Es wird dem Leser immer die Möglichkeit offeriert, sich weitere Fragen zu stellen und sie in weiterführenden Experimenten zu lösen.

Das vorliegende Werk wird abgerundet durch einen Anhang mit nützlichen Informationen wie Nährlösungen, physikalischen Einhei-

ten, Bezugsquellen für Chemikalien, und einem ausführlichen und vollständigen Sachverzeichnis.

Das vorliegende Werk ist allen Studenten und Dozenten der Fachrichtung Biologie als einführendes Lehrbuch sehr zu empfehlen. Aber auch dem bestandenen Forscher bietet es die Gelegenheit, pflanzenphysiologische Grundlagenkenntnisse wieder aufzufrischen.

Hans Peter Bucher

Douglas J. Futuyma: Evolutionsbiologie. Aus dem Englischen übersetzt und bearbeitet von Barbara König. Birkhäuser Verlag, Basel, 1990, 679 Seiten mit 28 Abbildungen, Preis Fr. 106.–.

Die «Evolutionary Biologie» ist erstmals 1979 in den USA ediert worden und liegt nun als deutschsprachige Fassung der zweiten Auflage von 1986 vor. Im Vorwort betont der Verfasser die Universalität der Evolutionsbiologie («... philosophischste aller biologischen Disziplinen ... – und auch die synthetischste [da sie alle biologischen Bereiche von der Molekularbiologie bis zur Ökologie umfasst und vereinheitlicht]») ebenso wie deren «intellektuelle Herausforderung, sich mit Fragen zu befassen, die vielleicht nie völlig beantwortet werden können ...» – Der umfangreiche Stoff wird in siebzehn Kapiteln abgehandelt; er bezieht sich grosso modo auf wissenschaftshistorische Fakten, auf elementare Ökologie und Genetik, Genetik des evolutionären Wandels, Artbildung und Anpassung, Systematik, Paläontologie, Biogeographie sowie auf Makroevolution, molekulare Evolution, Koevolution und schliesslich auf die Evolution des Menschen. Jedes Kapitel wird kurz zusammengefasst und versehen mit einem Katalog relevanter Fragen und mit Hinweisen auf weiterführende Literatur. Dem Buch selbst sind beigegeben eine kurze Einführung in elementare Statistik, ein Verzeichnis der verwendeten Symbole, ein Glossar, ein äusserst umfangreiches Literaturverzeichnis von nahezu 35 eng und zweispaltig bedruckten Seiten und ein Sachwort-Index.

Die «Evolutionsbiologie» ist als Lehrbuch ausgestattet; sie soll den Studierenden nach dem Propädeutikum einführen in das überaus weite Wissensgebiet und dem Fortgeschrittenen darin weiterhelfen. Als Nachschlagewerk wird sie auch dem nur am Rande interessierten Biologen hilfreich sein. Dem Skeptiker al der sich die Freiheit herausnimmt, die Evo tion nach wie vor als eine der möglichen Th rien zu betrachten, sich somit also dem Au der Evolution als Tatsache vorschreibt, n ohne weiteres anschliesst, bietet die «Evo tionsbiologie» Gelegenheit, seine Argume noch präziser zu fassen.

Hans Heinrich Bossh

Briefe an den Herausgeber

Die Rezension zu Harald Schill's Buch: «Triebbildung, Verzweigungsverhalten und Kronenentwicklung junger Fichten und Lärchen», die im Juniheft 1990 erschienen ist, hat Anlass gegeben zu einem Briefwechsel, der hier auszugsweise wiedergegeben wird. Ich erachte derartige Diskussionen als notwendig, und ich bin den Briefschreibern dankbar für ihre Meinungsäusserungen. Obwohl die Ansichten immer noch divergieren, halte ich es ebenso für notwendig, die Kontroverse mit den nachfolgenden Beiträgen als abgeschlossen zu betrachten.

Der Redaktor

Replik

In der Juniausgabe der «Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich» erschien eine Besprechung meines Buches «Triebbildung, Verzweigungsverhalten und Kronenentwicklung junger Fichten und Lärchen» (Birkhäuser Verlag, Basel).

Auf Grund offensichtlich mangelnder Recherchen sowie ungenügender Lektüre des Buches zeichnet der Rezensent ein durchweg negatives Bild. Zumindest dort, wo die Kritik an überprüfbaren Fakten ansetzt, erweist sie sich als haltlos und falsch.

Im Detail muss folgendes richtiggestellt werden:

– die geschilderten Ergebnisse «konzentrieren» sich keineswegs auf Syllepsis und Prolepsis allein. Vielmehr wurden bei beiden Baumarten sämtliche Austriebs- und Verzweigungsformen erfasst. Mehr als drei Viertel des gesamten Buchinhaltes bleiben somit in der Rezension unerwähnt.
– es ist nicht nachvollziehbar, warum bei einer Probenzahl von 130 Individuen/Baumart auf zwei deutlich unterschiedlich wuchskräftigen Standorten und gleichzeitiger Erfassung sämtlicher im Verlaufe von 5 Jahren gebildeten Trieben «keine grossen Aussagen» über die inner- und zwischenartliche Variabilität der untersuchten Parameter möglich sein sollten.
– die Anmerkung «Aussagen über endogene Einflüsse beruhen meist auf Vermutungen, die in der Regel weder durch Resultate noch durch Literaturzitate untermauert werden», ist unrichtig. Die beiden berücksichtigten Parameter genetische Veranlagung und Baumalter werden auf den Seiten 137/138 durch Literaturstellen sowie im Abschnitt 3.7.8. durch eigene Ergebnisse untermauert und abgesichert.
– falsch ist, dass sich «Aussagen über den *klimatischen* Einfluss auf Beobachtungen während einer einzigen Vegetationsperiode stützen». Der mögliche Einfluss der *Witterung* wurde für die Vegetationsperioden 1982–1989 geprüft und in den Abb. 47/48 dargestellt.
– die Behauptung, reguläre Langtriebe bei Lärche wären stets proleptischen Ursprungs, ist falsch (vgl. W. R. Remphrey, G. R. Powell, 1984a, 1984b, 1985). Vielmehr stellt das Durchtreiben von Kurztriebknospen einen eher seltenen Sonderfall dar. Dieser wäre in Abschnitt 3.1.1.2. nachzulesen gewesen.
– der Vorwurf nicht konsequent verwendeter Fachausdrücke wäre nicht entstanden, hätte der Rezensent die in Abschnitt 2.2.2. festgelegten Termini und Definitionen zur Kenntnis genommen.
– spätestens seit der grundlegenden Arbeit von Halle et al. (1978) haben die von Spaeth (1912) geprägten Fachausdrücke Eingang in die englischsprachige Literatur gefunden. Somit ist die Kritik, im englischen Summary neu geschaffene Termini übernommen oder selbst neu geschaffen zu haben, nichtig.

Harald Schill

Duplik

Meiner Antwort auf die Replik des Autors möchte ich voranstellen, dass ich – mit einer Ausnahme – alle Kritikpunkte aufrechterhalte und bei meinem Gesamturteil bleibe. Der Autor hat den Eindruck, dass *ich ungenügend* recherchiert und das Buch zuwenig genau studiert hätte. Ich habe

im Gegenteil sehr viel Zeit aufgewendet, um das Buch zu lesen und zu verstehen und habe auch relevante Literatur konsultiert. Zudem habe ich mich im Rahmen meiner Tätigkeit während mehrerer Jahre mit der Verzweigungsmorphologie von Fichte und Lärche befasst.

Die Serie «Contributiones Biologiae Arborum», als deren zweiter Band das erwähnte Buch erschienen ist, fordert: «Each Volume must be . . . of high quality . . .» (erste Umschlagseite). Aus diesem Grund habe ich einen entsprechend strengen Massstab angelegt. Natürlich bin ich mir bewusst, dass die Festlegung von «high quality» eine Ermessensfrage ist. So kann man sich zum Beispiel streiten, wieweit aufgrund von Untersuchungen auf zwei Standorten Aussagen über die inner- und zwischenartliche Variabilität möglich und – wenn man die beiden Standorte in Beziehung setzt zum grossen Verbreitungsgebiet und breiten ökologischen Spektrum der Fichte - sinnvoll sind. Es ist ebenfalls Ermessenssache, wann eine Aussage als untermauert und abgesichert gelten kann. Gerade zu diesem Punkt möchte ich zwei Beispiele erwähnen:

Auf S. 134 steht «Nach Halle et al. (1978) liegen bei Fichten und Lärchen vergleichbare Architekturmodelle der Krone vor». Ich habe das zitierte Buch konsultiert und eine Aussage über das Architekturmodell von Fichte gefunden, aber nichts über ein solches von Lärche.

In der englischen Zusammenfassung S. 149 steht: "In larch the ability to form short or long shoots according to the prevailing environmental conditions is an indication of the high plastic reactibility of this tree species." In den Abschnitten, auf die verwiesen wird, habe ich keine schlüssigen Hinweise gefunden, die diese in verschiedener Hinsicht hochinteressante Aussage untermauern könnten.

In der deutschen Zusammenfassung hat das Thema «Syllepsis» einen überaus grossen Stellenwert. Da ich davon ausging, dass in einer Zusammenfassung die einzelnen Themen nach ihrer Wichtigkeit dargestellt werden, kam ich zum Schluss, der Autor konzentriere sich auf Syllepsis und Prolepsis.

Mein Vorwurf in der Rezension bezüglich der Untersuchung von Witterungseinflüssen ist nicht berechtigt. Es ist mir eine Verwechslung mit dem jährlichen Wachstumsverlauf unterlaufen, für die ich mich beim Autor in aller Form entschuldigen möchte.

Ich erhalte die Behauptung aufrecht, dass bei Lärche aus einer «regulär» austreibenden vegetativen Knospe zuerst ein Kurztrieb entsteht, der nach einer mehrwöchigen Pause zu einem Langtrieb auswachsen kann. Dies ist (mindestens bei Larix decidua) eine charakteristische Eigenschaft der Langtriebbildung.

Im Abschnitt 2.2.2. sind die Ausdrücke «Trieb», «Terminaltrieb» und «Seitentrieb» nicht explizit definiert. Bei konsequenter Interpretation von Abb. 2 ergibt sich, dass mit «Terminaltrieb» die Hauptachse und mit «Seitentrieb» jede Achse erster oder höherer Verzweigungsordnung bezeichnet wird. Im Text werden diese Ausdrücke aber anders angewendet.

Ich bin mit der englischsprachigen Standardliteratur im Bereich Morphologie und Wachstumsphysiologie ziemlich gut vertraut und weiss, welche Ausdrücke seit dem Werk von Halle et al. (1978) in die englische Fachsprache aufgenommen worden sind. Meine Bemerkung zur Verwendung englischer Fachausdrücke bezieht sich aber nicht nur auf die von Spaeth (1912) geschaffenen Ausdrücke. Der Autor hat sich der englischen Sprache gegenüber in verschiedener Hinsicht viele Freiheiten herausgenommen.

Markus Sieber

rstand der Naturforschenden Gesellschaft Zürich 1990/91

sident: Prof. Dr. Stephan Müller
Inst. für Geophysik ETH
ETH Hönggerberg
8093 Zürich, Tel. 377 26 10

epräsident: Prof. Dr. Klaus Itten
Geogr. Inst. Universität
Winterthurerstr. 190
8057 Zürich, Tel. 257 51 60

retär: Dr. Heinrich Bührer
EAWAG/ETH
Überlandstr. 133
8600 Dübendorf
Tel. 823 51 85

istor: Ferdinand Stutz
Finanz- und Treuhand AG
Chrottenbuckstrasse 10
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 23 58

laktor: Prof. em. Dr. H.H. Bosshard
Im Stucki 5
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 19 61

hivar: Dr. Markus Schnitter
Zumikerstr. 20
8700 Küsnacht, Tel. 9105691

sitzer: Prof. Horst Dargel
Im Ahorn 15
8125 Zollikerberg
Tel. 391 68 89

Prof. Dr. Erich Dubler
Anorganisch-chemisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 46 21

Prof. Dr. Rolf Nöthiger
Zoologisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 48 61

PD Dr. Irene Tobler-Kost
Pharmakol. Inst. Universität
Gloriastr. 32
8006 Zürich, Tel. 257 26 82

PD Dr. med. Eugen Schönle
Universitäts-Kinderklinik
Steinwiesstrasse 75
8032 Zürich, Tel. 259 71 11

PD Dr. Hannes Schüepp
Eidg. Forschungsanstalt
für Obst-, Wein- und
Gartenbau
8820 Wädenswil, Tel. 783 63 15

Dr. Rosmarie Waldner
Stuhlenstr. 23
8123 Ebmatingen
Tel. 980 11 38

Vertreter in der Kommission der Zentralbibliothek:
Prof. H. Dargel

Naturschutzaufgaben:
Prof. Dr. Andreas Gigon

Vertreter im Senat der SNG:
Dr. Heinrich Bührer

Rechnungsrevisoren:
Werner Kübler
Sägegasse 8
8702 Zollikon, Tel. 391 55 83

Mario Stolz
Bundtacherstrasse 5
8127 Forch, Tel. 980 07 80

Stellvertreter:
Dr. Andreas Fischer
Grundwiesstrasse 10
8700 Küsnacht, Tel. 910 69 26

Iinweise für Autoren

Manuskript

.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

.3 Einzelheiten zum Text

.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle . . .).

.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 Bilder

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild . . .) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500:1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der
Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 136, Heft 1, März 1991

Inhalt

Preis Fr. 19.–

Heft 2
Jahrgang 136
Juni 1991

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85*, zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.-), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 83.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die ‹Hinweise für Autoren› auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. em. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich)*. – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

flage: 2230; Tauschexemplare 546.

5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/2: 77–91

Energiekonservierung in anaeroben Bakterien

Peter Dimroth, ETH Zürich

Die ersten Lebewesen auf dieser Erde waren Anaerobier, denn eine O_2-haltige Atmosphäre bildete sich erst nach der Entstehung der Photosynthese. Auch auf der heutigen Erde gibt es noch ausgedehnte O_2-freie Bereiche, die von anaeroben Mikroorganismen besiedelt werden. Diese Organismen sind dazu in der Lage, ein breites Spektrum von organischen Verbindungen abzubauen, wobei die Mechanismen der biologischen Energiekonservierung jedoch begrenzt sind. Zum Teil sind diese Mechanismen identisch oder ähnlich wie die ihrer aeroben Artgenossen. Eine grosse Zahl anaerober Bakterien synthetisiert ihr gesamtes ATP durch Substratkettenphosphorylierung. Andere benutzen einen chemiosmotischen Mechanismus für die ATP-Synthese. Der als Triebkraft für die ATPase dienende elektrochemische Protonengradient wird dabei von einer anaeroben Atmungskette erzeugt, in der statt Sauerstoff ein weniger starkes Oxidationsmittel, z. B. Sulfat oder Schwefel, als terminaler Elektronenacceptor fungiert. In *Propionigenium modestum* wird durch Decarboxylierung von Methylmalonyl-CoA ein elektrochemischer Na^+-Gradient über die Membran aufgebaut, der von einer speziellen Na^+-translozierenden ATPase zur ATP-Synthese genutzt wird. *Oxalobacter formigenes* erzeugt in einem 1:1-Gegentausch von Oxalat gegen Formiat einen elektrochemischen Protonengradienten, der für die ATP-Synthese verwendet wird. Getrieben wird der Austausch von der Decarboxylierung des Oxalats, denn hierdurch bildet sich für Oxalat ein von aussen nach innen und für Formiat ein von innen nach aussen gerichteter Konzentrationsgradient über die Membran hinweg.

Energy Conservation in Anaerobic Bacteria

The first forms of life on the earth were anaerobes, because an O_2-containing atmosphere formed only after the development of photosynthesis. Extended O_2-free areas exist even on earth today, which are occupied by anaerobic microorganisms. These organisms can degrade a broad spectrum of organic compounds, but use only a few mechanisms for the conservation of biological energy. These mechanisms are in part identical or similar to those of their aerobic counterparts. A huge number of anaerobic bacteria synthesize ATP entirely by substrate-level phosphorylation. Others use a chemiosmotic mechanism for ATP synthesis. The electrochemical gradient of protons required as driving force for the ATPase is created by an anaerobic respiratory chain, in which oxygen as terminal electron acceptor is replaced by a less strong oxidant, e.g. sulfate or sulfur. In *Propionigenium modestum*, an electrochemical Na^+ ion gradient is created over the membrane by decarboxylation of methylmalonyl-CoA, which is used for ATP synthesis by a particular Na^+-translocating ATPase. *Oxalobacter formigenes* in a 1:1 exchange of oxalate for formate forms an electrochemical proton gradient which is used for ATP synthesis. The exchange is driven by the decarboxylation of oxalate, developing a concentration gradient over the membrane which for oxalate is directed from the outside to the inside and for formate from the inside to the outside.

1 Einleitung.

Seit alters her haben sich die Menschen die Stoffwechselleistungen anaerober Mikroorganismen zunutze gemacht, so etwa die der alkoholischen Gärung zur Herstellung alkoholischer Getränke wie Wein und Bier oder der Milchsäuregärung zur Konservierung von Lebensmitteln und zur Herstellung verschiedener Milchprodukte.

Durch die immer dichter werdende Besiedlung dieser Erde wird die Reinhaltung des Wassers zu einer immer grösseren Herausforderung. Es hat sich gezeigt, dass anaerobe Bakterien vorteilhaft zur Klärung von mit organischen Stoffen belasteten Abwässern eingesetzt werden können. Mit dieser Art der Abwasserklärung lassen sich gegenüber den aeroben Kläranlagen mit ihren intensiven Rühr- und Belüftungssystemen gewaltige Energiemengen einsparen, und darüber hinaus kann das im Anaeroben gebildete Methan als Energiequelle genutzt werden. Aufwendige Kontroll- und Regeleinrichtungen, die zur Gewährleistung einer gleichmässigen Sauerstoffversorgung in aeroben Klärbekken erforderlich sind, entfallen bei anaerober Prozessführung. Wegen des langsameren Wachstums der anaeroben Organismen ist allerdings eine längere Verweilzeit der Abwässer und damit der Bau grösserer Behälter erforderlich.

Die steigenden Ölpreise, die wir gerade jetzt wieder erleben, führen uns vor Augen, dass die fossilen Lagerstätten an Öl, Gas und Kohle kostbare Rohstoffe darstellen, mit deren Verbrauch wir bedeutend behutsamer umgehen sollten, als dies in den letzten Jahrzehnten geschehen ist. Es ist deshalb von immenser Bedeutung, nach Wegen Ausschau zu halten, wie Rohstoffe und Energiequellen sich aus nachwachsenden Materialien gewinnen lassen. Hierzu können anaerobe Bakterien einen wichtigen Beitrag leisten. So lassen sich durch den anaeroben Abbau organischer Abfallprodukte eine Reihe von Substanzen gewinnen, die als Chemierohstoffe oder als Energiequelle genutzt werden können. Dazu zählen z. B. Methan, Ethanol, andere Lösungsmittel wie Aceton oder Butanol und organische Säuren. Ausserdem lässt sich das beeindruckend vielfältige katalytische Potential der Anaerobier nutzen, um bestimmte chemische Reaktionen hochspezifisch und bei nur etwa 30 °C ablaufen zu lassen, und es können aus solchen Bakterien Enzyme für synthetische und diagnostische Zwecke gewonnen werden. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass das Interesse an der Erforschung anaerober Bakterien in den letzten 15 Jahren stark zugenommen hat. In diese Zeit fiel auch eine wesentliche Verbesserung der Techniken zur Isolierung und Handhabung strikter Anaerobier, die heute zur Routine eines jeden guten mikrobiologischen Laboratoriums gehören.

Da Sauerstoff in der Uratmosphäre nicht vorhanden war, müssen die ältesten Organismen auf der Erde Anaerobier gewesen sein. Eine O_2-haltige Atmosphäre bildete sich vor ca. 2,5 Milliarden Jahren mit der Entwicklung von Organismen, die zur Photosynthese und damit zur Bildung von O_2 in der Lage waren. Bis vor 0,6 Milliarden Jahren hatte sich der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre wahrscheinlich nur auf 2 % erhöht. Erst nachdem die grünen Pflanzen das Land erobert und mit einer dichten Pflanzendecke überzogen hatten, nahm die Sauerstoffkonzentration rasch zu und erreichte mit 21 % O_2 ihren heutigen Wert. Sauerstoff, der für die meisten eukaryontischen Lebewesen essentiell ist, ist somit klar eine Folge von Leben auf dieser Erde und nicht dessen Voraussetzung.

Auf der heutigen Erde werden durch die photosynthetischen Leistungen der grünen Pflanzen, der Algen und der Cyanobakterien jährlich etwa 130 Milliar-

den Tonnen als CO_2-gebundener Kohlenstoff zu organischen Verbindungen reduziert. Diesen Photosyntheseleistungen stehen abbauende Prozesse gegenüber, bei denen die organischen Verbindungen wieder zu CO_2 oxidiert werden, wobei die bei diesen Oxidationen gewonnene Energie das Wachstum der betreffenden Organismen ermöglicht.

An der endgültigen Mineralisierung des organischen Materials, d. h. an dessen Überführung in CO_2, H_2S und NH_3 als den prinzipiellen Endprodukten, haben Bakterien einen wesentlichen Anteil. Der weitaus grösste Teil dieser Abbauprozesse findet aerob, d. h. unter Beteiligung von O_2, statt. Die anaeroben Abbauprozesse sind auf einzelne Nieschen beschränkt, etwa auf anaerobe Sedimente und anaerobe Bereiche von Seen und Meeren, oder auf die Verdauungsorgane von Tieren und Menschen. Dennoch sind anaerobe Abbauvorgänge von grundlegendem Interesse für das Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs in der Natur sowie für die verschiedenen daran beteiligten Reaktionen und Organismen.

2 Zentrale Stellung von ATP im zellulären Energiestoffwechsel.

Eine unmittelbare Voraussetzung für jegliches Leben ist die permanente Zufuhr von Energie. Die Bioenergetik befasst sich mit den Vorgängen, mit denen sich die Zelle die äusseren Energiequellen erschliesst und für ihre eigenen energie-

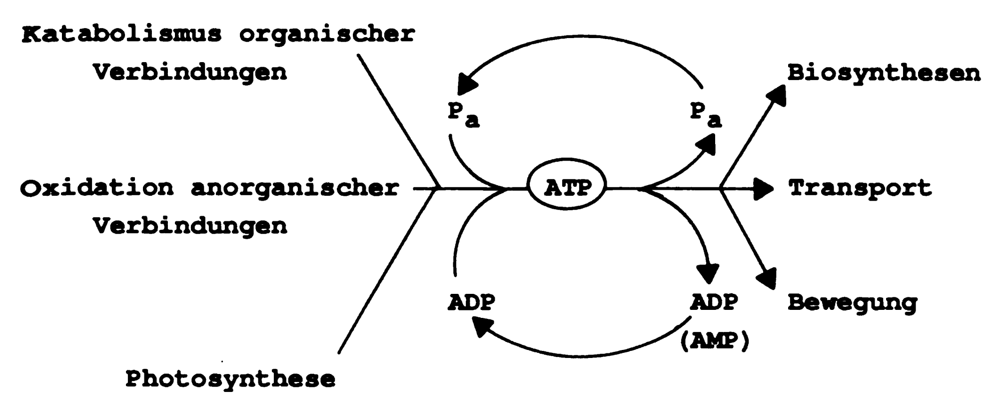


Bild 1 ATP als zentrales Zwischenprodukt im zellulären Energiestoffwechsel

Fig. 1 ATP as the central intermediate in cellular energy metabolism

abhängigen Leistungen nutzbar macht. Von zentraler Bedeutung bei den energie-transformierenden Vorgängen ist das Adenosintriphosphat (abgekürzt ATP). Dieses stellt sozusagen die Währung dar, mit der die bioenergetischen Leistungen einer Zelle beglichen werden. Auf dem in Bild 1 dargestellten Schema wird dies *deutlich*. Alle lebenden Zellen besitzen irgendeinen Mecha-

nismus, mit dem sie von aussen zugeführte Energie für die Biosynthese von ATP aus ADP und anorganischem Phosphat verwenden können. Für die Synthese von 1 Mol ATP müssen unter physiologischen Bedingungen etwa 40 kJ aufgewendet werden. Von dieser Energie, die in der Phosphorsäureanhydridbindung des ATP gespeichert ist, macht die Zelle Gebrauch, um die endergonen Biosynthesen sowie aktiven Transport und die Bewegungsvorgänge möglich zu machen. Im folgenden möchte ich mich auf die Mechanismen beschränken, die zur ATP-Synthese führen, und zwar unter besonderer Berücksichtigung der anaeroben Bakterien.

Das Spektrum der von anaeroben Bakterien abbaubaren Substanzen offenbart ein riesiges Potential kataboler Stoffwechselwege, das noch ständig durch die Isolierung neuer Organismen erweitert wird. Für die ATP-Synthese selbst steht jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Reaktionen zur Verfügung.

3 Grenzen der Energiegewinnung im anaeroben Stoffwechsel.

Ein grundsätzliches Problem, mit dem die aneroben Organismen konfrontiert sind, besteht in der geringen freien Energie, die beim Substratabbau in Abwesenheit von Sauerstoff entsteht. Eine Betrachtung der bei vollständiger Oxidation von Glucose mit O_2 zu CO_2 und H_2O gebildeten ATP-Menge soll dies verdeutlichen. Der Vorgang lässt sich in zwei Stufen unterteilen (Bild 2). In der ersten von den Enzymen der Glycolyse und des Citronensäurecyclus katalysierten Stufe wird die Glucose mittels intrazellulärer Oxidationsmittel (NAD^+ und

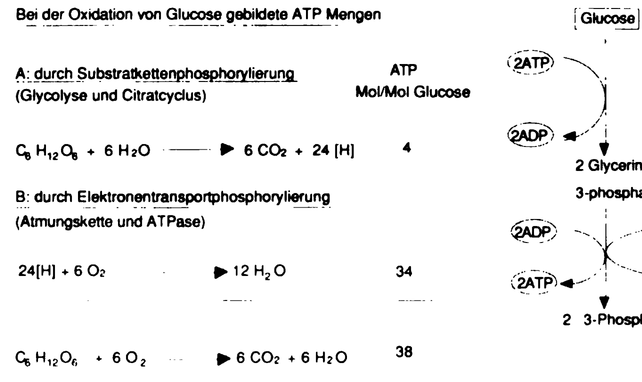


Bild 2 ATP-Bildung in den an der vollständigen Oxidation von Glucose zu CO_2 und H_2O beteiligten Prozessen

Fig. 2 ATP synthesis during the processes *leading to the complete oxidation of glucose to CO_2 and H_2O*

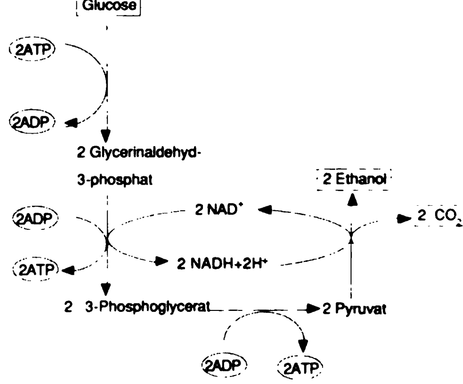


Bild 3 Schema für die Vergärung von Glucose zu Ethanol und CO_2

Fig. 3 Scheme for the fermentation of glucose to ethanol and CO_2

FAD^+) vollständig zu CO_2 oxidiert. Daran schliesst sich die von den Enzymen der Atmungskette katalysierte Elektronenübertragung von dem gebildeten NADH und $FADH_2$ auf den Sauerstoff an, wobei die oxidierten Cofaktoren regeneriert werden. Die energetische Betrachtung dieser beiden an der Oxidation des Zuckers beteiligten Vorgänge zeigt, dass bei der ersten ohne Beteiligung von O_2 ablaufenden Stufe lediglich 4 ATP-Moleküle gebildet werden, während es bei der Elektronenübertragung von den reduzierten Cofaktoren auf den Sauerstoff zur Synthese von 34 ATP-Molekülen kommt. Aus diesen Überlegungen ergibt sich zwangsläufig, dass anaerobe Bakterien, die die Elektronenübertragung auf den Sauerstoff naturgemäss nicht durchführen können, nur einen Bruchteil der ATP-Menge pro Mol abgebautem Substrat synthetisieren können wie ihre aeroben Artgenossen.

4 Energiekonservierung durch Substratkettenphosphorylierung.

Grundsätzlich erfolgt auch im anaeroben Bereich der Energiegewinn aus der Oxidation der organischen Kohlenstoffverbindungen. Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, dass zum Ausgleich der Elektronenbilanz entweder ein externer, von O_2 verschiedener Elektronenacceptor benötigt wird, oder aber die Elektronen innerhalb der Kohlenstoffverbindungen so verschoben werden, dass ein Teil der Kohlenstoffatome der Produkte stärker oxidiert und ein Teil stärker reduziert vorliegt als in der Ausgangsverbindung.

Ein gut untersuchtes Beispiel für den 2. Typ ist die in Bild 3 dargestellte alkoholische Gärung. In deren Verlauf wird ein Teil der Kohlenstoffatome der Glucose zu CO_2 oxidiert, ein anderer zur Methylgruppe von Ethanol reduziert. Im Zuge des Glucoseabbaus werden die Elektronen bei der Oxidation von 3-Phosphoglycerinaldehyd zu 3-Phosphoglycerinsäure auf NAD^+ übertragen und das so gebildete NADH zur Reduktion von Acetaldehyd zu Aethanol verwendet. Wie in diesem Beispiel gezeigt, muss bei derartigen Gärungen die Bilanz von NADH liefernden und NADH verbrauchenden Reaktionen aufgehen, weil der Cofaktor nur in katalytischen Mengen in den Zellen zur Verfügung steht.

Aus dem in Bild 3 dargestellten Stoffwechsel der alkoholischen Gärung wird bereits eine Möglichkeit ersichtlich, wie unter anaeroben Bedingungen ATP synthetisiert werden kann. Der Mechanismus der an die Oxidation von Glyerinaldehyd-3-Phosphat zu 3-Phosphoglycerat gekoppelten ATP-Synthese ist im Detail in Bild 4 gezeigt. Die Oxidation des Glycerinaldehyd-3-Phosphats führt zur Bildung des Carbonsäure-Phosphorsäure Anhydrids des 1,3-Diphosphoglycerats, in dem die freie Energie der Oxidationsreaktion quasi als Bindungsenergie konserviert ist. Es ist daher möglich, den Phosphatrest in der nachfolgenden von 3-Phosphoglyceratkinase katalysierten Reaktion auf ADP zu übertragen und damit ATP zu synthetisieren. Dieses ist ein klassisches Beispiel der sog. *Substratphosphorylierung*, dessen Chemie bereits in den 30er Jahren von Otto

Warburg aufgeklärt wurde. Andere Beispiele für Substratphosphorylierung sind die Übertragung des Phosphatrestes von Phosphoenolpyruvat oder Acetyl-Phosphat auf ADP unter ATP-Bildung (Bild 5). Enolphosphate und Acylphosphate sind sog. energiereiche Verbindungen, bei denen die freie Energie der Hydrolyse der Bindung zur Phosphorsäure in der gleichen Grössenordnung liegt wie im ATP. Charakteristisch für die unter dem Begriff Substratphosphorylierung zusammengefassten Reaktionen ist die Speicherung der Energie einer exergonen Reaktion in Form einer energiereichen Phosphatverbindung, von der aus der Phosphatrest in einer nachgeschalteten Reaktion auf ADP übertragen

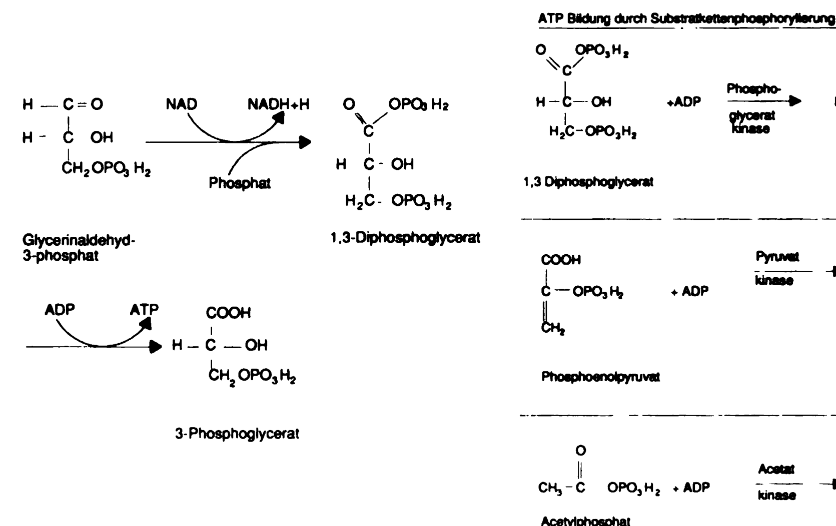


Bild 4 ATP-Synthese bei der Oxidation von Glycerinaldehyd-3-Phosphat zu 3-Phosphoglycerat

Fig. 4 ATP synthesis during the oxidation of glycerinaldehyde-3-phosphate to 3-phosphoglycerate

Bild 5 Reaktionen, die zur Substratkettenphosphorylierung führen

Fig. 5 Reactions leading to substrate-level-phosphorylations

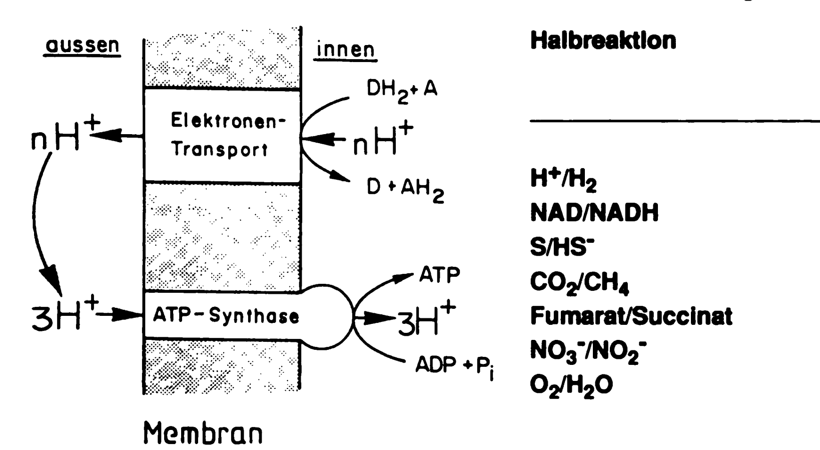
werden kann. Substratkettenphosphorylierungen finden unter der Katalyse löslicher Enzyme im Cytoplasma statt.

5 Energiekonservierung durch anaerobe Atmung.

Alle anderen zur Biosynthese von ATP führenden Reaktionen laufen in den Membranen ab und sind strikt von einer in sich geschlossenen Membran abhängig. Im Zuge der Elektronentransport-Phosphorylierung wird die freie Energie einer Oxidationsreaktion von Komponenten der Atmungskette genützt, um einen elektrochemischen Protonengradienten über die Membran aufzubauen. Dieser Protonengradient dient der ebenfalls in der Membran verankerten

ATPase als Triebkraft für die Synthese von ATP aus ADP und anorganischem Phosphat. Dieser in Bild 6 dargestellte Vorgang folgt einer Theorie von Peter Mitchell, die lange Zeit heftig umstritten war, heute aber allgemein akzeptiert und durch viele experimentelle Befunde belegt ist.

In vielen anaeroben Bakterien wird ATP nach einem ähnlichen Mechanismus synthetisiert. Der wesentliche Unterschied zu den aeroben Artgenossen besteht darin, dass der Sauerstoff bei den Anaerobiern durch andere terminale Elektronenacceptoren ersetzt ist. So benutzen beispielsweise die Sulfat reduzierenden Bakterien Sulfat und die methanogenen Bakterien CO_2 als terminalen Elektronenacceptor. Andere Elektronenacceptoren anerober Bakterien sind z. B. Fumarat, Schwefel, Dimethylsulfoxid und Trimethylamin N-oxid. In diesen anaeroben Atmungsketten wird ganz analog zur Atmung mit O_2 ein elektrochemischer Protonengradient über die Membran aufgebaut, der von der ATPase als Triebkraft für die endergone ATP-Synthese benutzt wird. Auf Bild 7 sind die Redoxpotentiale einiger für die anaerobe Atmung wichtiger Elektronenacceptoren wiedergegeben. Man erkennt daraus, dass es sich bei den anaeroben Elektronenacceptoren Nitrat, Fumarat, CO_2 und Schwefel im Vergleich zum Sauerstoff um sehr viel schwächere Oxidationsmittel handelt. Deshalb liefert die Oxidation eines Elektronendonors wie NADH oder H_2 mit den anaeroben



Halbreaktion	$E^{0'}$ mV
H^+/H_2	-410
NAD/NADH	-320
S/HS^-	-270
CO_2/CH_4	-244
Fumarat/Succinat	+ 33
NO_3^-/NO_2^-	+433
O_2/H_2O	+818

Bild 6 Schema der Elektronentransport-Phosphorylierung. Von der Atmungskette wird ein elektrochemischer Protonengradient über die Membran aufgebaut, der von der ATPase (ATP-Synthase) als Triebkraft für die ATP-Synthese verwendet wird

Fig. 6 Scheme of the electron transport phosphorylation. An electrochemical proton gradient across the membrane is generated by the respiratory chain, which is used by the AT-Pase (ATP synthase) as driving force for ATP synthesis

Bild 7 Redoxpotentiale einiger biologisch wichtiger Redoxreaktionen

Fig. 7 Redoxpotentials of some biologically important redox reactions

Elektronenacceptoren sehr viel geringere Energiebeträge als mit O_2, und deshalb ist auch die durch anaerobe Atmung gebildete Menge ATP sehr viel kleiner.

An dem Bakterium *Wolinella succinogenes* ist der Mechanismus der Bildung eines elektrochemischen Protonengradienten durch anaerobe Atmung und dessen Verwendung zur ATP-Synthese gut untersucht worden (A. Kröger, 1987). Wenn das Bakterium mit Formiat als Elektronendonator und Fumarat als Elektronenacceptor wächst, dann enthält es auf der Aussenseite der Membran eine Formiat Dehydrogenase und auf der Innenseite eine Fumarat Reduktase. In Bild 8 ist gezeigt, dass die Elektronen der Formiat Oxidation von der Formiat Dehydrogenase über Menachinon quer über die Membran zur Fumarat Reduktase gelangen, von wo sie dann unter Bildung von Succinat auf Fumarat übertragen werden. Durch diese Elektronenverschiebung über die Membran hinweg wird ein aussen positives und innen negatives Membranpotential aufgebaut. Man sieht ausserdem, dass bei der Formiat Oxidation an der Aussenseite der Membran Protonen freigesetzt werden, während Protonen an der Innenseite der Membran zur Fumarat Reduktion verbraucht werden. Insgesamt entsteht also ein elektrochemischer Protonengradient ($H^+_{aussen} > H^+_{innen}$). Dieser Protonengradient dient der ebenfalls in der Membran verankerten ATPase als Triebkraft für die ATP-Synthese.

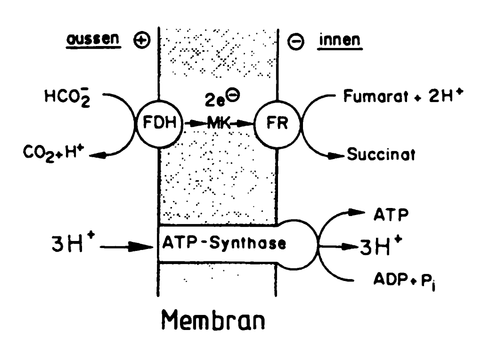


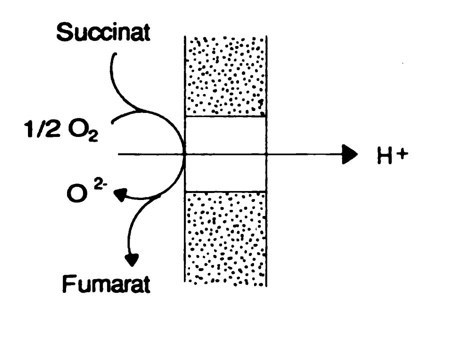
Bild 8 Mechanismus der Bildung eines elektrochemischen Protonengradienten mit einer Atmungskette aus Formiat Dehydrogenase und Fumarat Reduktase

Fig. 8 Mechanism of the formation of an electrochemical proton gradient with a respiratory chain composed of formate dehydrogenase and fumarate reductase

Bei dieser Gelegenheit möchte ich noch auf einige Besonderheiten des anaeroben Stoffwechsels hinweisen. Wir haben gesehen, dass die Fumaratreduktion mit Formiat freiwillig abläuft und dabei auch noch Energie liefert. Andererseits ist die Oxidation von Succinat zu Fumarat ein ganz normaler Schritt des Citronensäurecyclus. Diese Reaktion läuft jedoch nur mit O_2 als Oxidationsmittel freiwillig ab. Mit Schwefel als Elektronenacceptor ist die Succinatoxidation dagegen endergon. Trotzdem kann *Desulfuromonas acetoxidans* Acetat über den Citronensäurecyclus mit Schwefel als Elektronenacceptor oxidieren. Der kritische Schritt dabei ist die endergone Oxidation von ccinat mit Schwefel. Zur Überwindung der Energiebarriere wird der elektronische Protonengradient herangezogen, der unter ATP Hydrolyse aufge- vird; bei der Succinatoxidation werden, wie in Bild 9 gezeigt, Protonen in

Richtung ihres Gradienten in die Zelle aufgenommen. Man spricht hier von einem umgekehrten Elektronentransport, weil die Elektronen hier entgegen ihrer Vorzugsrichtung unter Energiezufuhr von dem Substratpaar mit positiverem zu dem mit negativerem Redoxpotential fliessen (R. K. Thauer, 1988).

Das Zusammenleben mehrerer anaerober Bakterien mit aufeinander abgestimmten Stoffwechselleistungen ist eine andere geniale Lösung energetischer Probleme. So ist die freie Energie der Ethanoloxidation zu Acetat und H_2 unter Standardbedingungen mit $\Delta G^{O'}=+9.6$ kJ/Mol endergon, wird aber bei Verringerung der H_2-Konzentration auf sehr kleine Werte exergon. Deshalb können die Ethanol oxidierenden Bakterien nur in enger Symbiose mit Methanbakterien leben, die den Wasserstoff verbrauchen, um Methan zu bilden, und ihn dabei auf sehr niedriger Konzentration halten. Das Leben dieser Bakterien ist daher wie in Bild 10 gezeigt auf den H_2-Transfer zwischen den beiden Spezies angewiesen (M. J. Wolin und T. L. Miller, 1982).



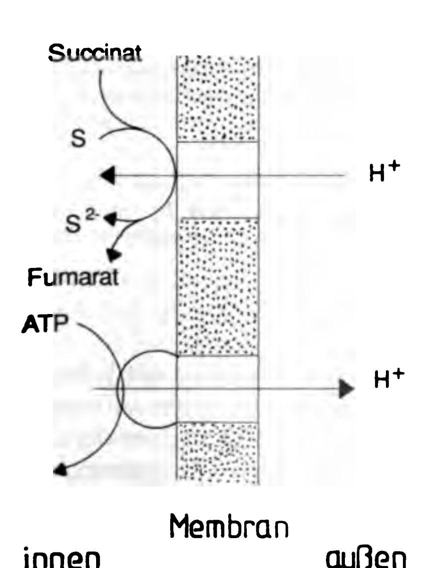


Bild 9 Schematische Darstellung der Succinat-Oxidation mit O_2, die zum Aufbau eines elektrochemischen Protonengradienten führt, und der Succinat-Oxidation mit S, die von einem unter ATP Hydrolyse gebildeten Protonen-Gradienten angetrieben wird

Fig. 9 Schematic drawing of succinate oxidation with O_2, leading to the generation of an electrochemical gradient of protons and of succinate oxidation with S which is driven by a proton gradient generated by ATP hydrolysis

6 Energiekonservierung mit Membran-gebundenen Decarboxylasen.

Vor etwa 10 Jahren habe ich einen weiteren Energiekonservierungsmechanismus in anaeroben Bakterien entdeckt (P. Dimroth, 1987). Bei diesem wird nicht die Energie von Oxidationsreaktionen, sondern die der Decarboxylierung bestimmter aktivierter Carbonsäuren konserviert. Als Beispiel ist in Bild 11 der Mechanismus der Energiekonservierung durch Oxalacetat Decarboxylase in *Klebsiella pneumoniae* wiedergegeben. Dieses ist das zweite Enzym des anaeroben Citratabbaus; es ist in der Cytoplasmamembran des Bakteriums lokalisiert. Die freie Energie der Decarboxylierung von Oxalacetat zu Pyruvat ($\Delta G^{o\prime}$=–28 kJ/Mol) wird verwendet, um Na^+-Ionen aus dem Cytoplasma nach aussen zu pumpen. Der so gebildete elektrochemische Na^+-Gradient dient den Bakterien als Triebkraft für die Aufnahme des Wachstumssubstrats Citrat in die Zelle. In unserem Labor beschäftigen wir uns eingehend mit der Struktur und der Funktion der Oxalacetat Decarboxylase und anderer verwandter Na^+-translozierender Decarboxylasen. Wir haben einige dieser Decarboxylasen vollständig gereinigt und bezüglich ihrer strukturellen und funktionellen Eigenschaften

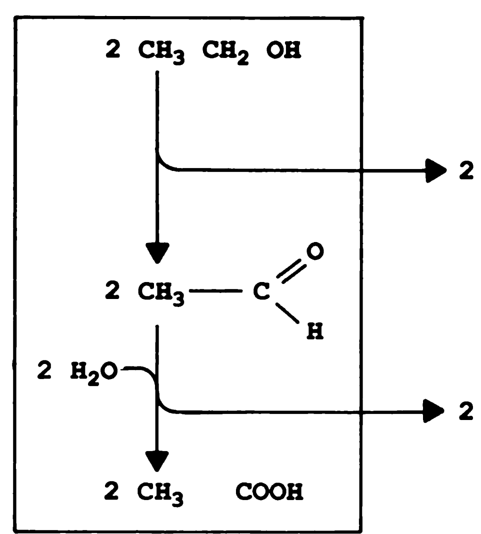


Bild 10 Wasserstoffübertragung zwischen verschiedenen Spezies. Der Verbrauch des H_2 von dem methanogenen Bakterium ermöglicht die Oxidation von Ethanol durch den S-Organismus

Fig. 10 Hydrogen transfer between different species. The consumption of H_2 by the methanogenic bacterium allows the oxidation of ethanol by the S-organism

untersucht. Ein Funktionsmodell der Oxalacetat Decarboxylase ist auf Bild 12 gezeigt (P. Dimroth, 1990). Die β- und γ-Untereinheiten des Enzyms sind fest in der Membran verankert und über Protein-Protein-Wechselwirkung mit der ins Cytoplasma hereinragenden α- Untereinheit verbunden. Der Katalysemechasmus beginnt mit der Übertragung der Carboxylgruppe des Oxalacetats auf prosthetische Gruppe Biotin, die an die α-Untereinheit gebunden ist. Dabei teht das Produkt Pyruvat. Hieran schliesst sich die von der β- oder (β+γ)-

Untereinheit katalysierte Decarboxylierung des Carboxybiotinenzyms an. Dieser Schritt ist vermutlich über eine Konformationsänderung des Enzyms an den Transport von Na^+-Ionen aus dem Cytoplasma ins Periplasma gekoppelt. Zukünftige Untersuchungen an diesem System verfolgen das Ziel, an diesem relativ einfachen Modell den molekularen Mechanismus der Kopplung zwischen der vektoriellen Kationentranslokation durch die Membran und der chemischen Decarboxylierungsreaktion aufzuklären.

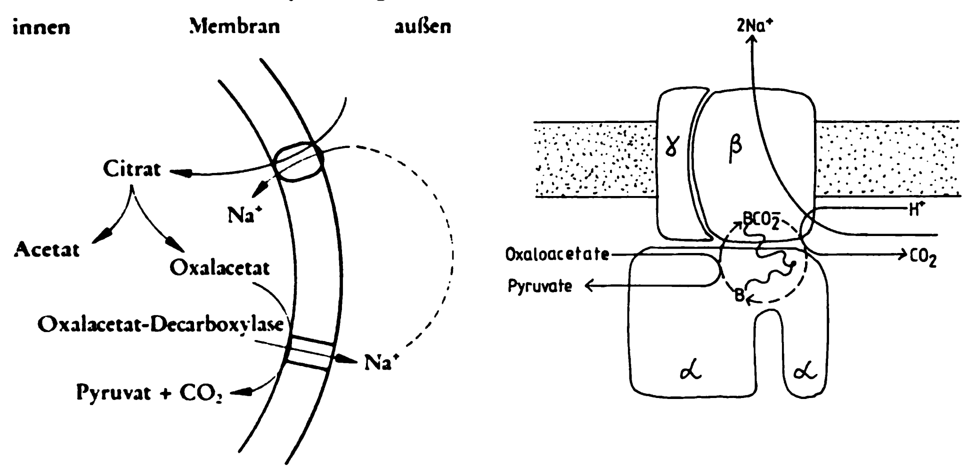


Bild 11 Na^+-Cyclus in *Klebsiella pneumoniae*. Von Oxalacetat Decarboxylase nach aussen gepumpte Na^+-Ionen werden benutzt, um Citrat aktiv in die Zellen aufzunehmen

Fig. 11 Na^+ cycle in *Klebsiella pneumoniae*. Sodium ions pumped outwards by oxaloacetate decarboxylase are used for the active transport of citrate into the cells

Bild 12 Struktur-Funktions-Modell von Oxalacetat Decarboxylase. Die α-Untereinheit katalysiert die CO_2-Übertragung von Oxalacetat auf die prosthetische Gruppe Biotin. Der Na^+-Transport ist an die Decarboxylierung des Carboxybiotins durch die β-(oder β+γ)-Untereinheiten gekoppelt

Fig. 12 Structural-functional model of oxaloacetate decarboxylase. The α-subunit catalyzes the CO_2-transfer from oxaloacetate to the prosthetic group biotin. The transport of Na^+ is coupled to the decarboxylation of the carboxybiotin by the β-(or β+γ)-subunits

In *Propionigenium modestum* stellt der von der verwandten Methylmalonyl-CoA Decarboxylase gebildete Na^+-Gradient die einzige Energiequelle dar, die diesem Bakterium zur ATP-Synthese zur Verfügung steht (W. Hilpert et al., 1984). Ein Schema des Energiestoffwechsels dieses strikt anaeroben Bakteriums ist auf Bild 13 zu sehen (P. Dimroth, 1990). Succinat wird von der Zelle aufgenommen und nach Aktivierung zum Thioester zu Methylmalonyl-CoA umgelagert. Dessen Decarboxylierung zu Propionyl-CoA mittels einer Membran-gebundenen Decarboxylase führt zum Aufbau eines elektrochemischen Na^+-Gradienten, der von einer ATPase direkt als Energiequelle für die ATP-Synthese genutzt wird. Dies ist das erste Beispiel für eine chemiosmotische

ATP-Synthese durch einen Na^+-Cyclus anstelle des üblichen Protonenkreislaufs. Besonders interessant ist die enge strukturelle und funktionelle Verwandtschaft der *P.modestum* ATPase zu den Protonen-translozierenden ATPasen anderer Bakterien sowie aus Mitochondrien und Chloroplasten. Die Untersuchungen führen zu dem Schluss, dass das Na^+ im Katalysemechanismus der *P.modestum* ATPase genau die gleiche Funktion ausübt wie die Protonen bei den H^+-translozierenden ATPasen. Durch diese Erweiterung der Kationenspezifität werden alle ATP-Synthese-Mechanismen widerlegt, die eine spezifisch von Protonen auszuübende Funktion erfordern (W. Laubinger and P. Dimroth, 1987, 1988, 1989).

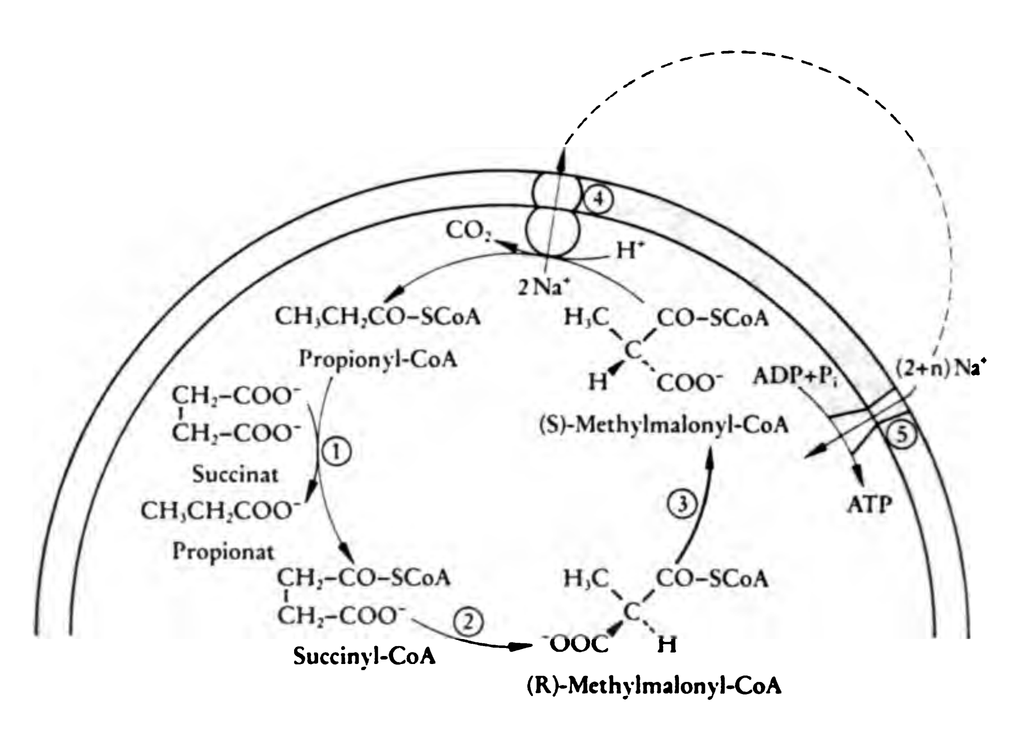


Bild 13 Energie-Metabolismus von *Propionigenium modestum* mit einem Na^+-Cyclus als Bindeglied zwischen der exergonen Decarboxylierung von Methylmalonyl-CoA und der endergonen ATP-Synthese. Die am Stoffwechsel beteiligten Enzyme sind: 1 = Propionyl-CoA-Succinat-CoA-Transferase; 2 = Methylmalonyl-CoA-Mutase; 3 = Methylmalonyl-CoA-Racemase; 4 = Methylmalonyl-CoA-Decarboxylase; 5 = ATP-Synthase (ATPase)

…g. 13 Energy metabolism of *Propionigenium modestum* with a Na^+ cycle connecting the …gonic decarboxylation of methylmalonyl-CoA to endergonic ATP synthesis. The enzymes …lved in the metabolism are: 1 = propionyl-CoA-succinate-CoA-transferase; 2 = methylmalo-…-CoA-mutase; 3 = methylmalonyl-CoA-racemase; 4 = methylmalonyl-CoA-decarboxylase; 5 …ynthase (ATPase)

Es gibt noch einen anderen interessanten Aspekt des Mechanismus der ATP-Synthese in *P.modestum*. Aus bioenergetischer Sicht stösst die durch Decarboxylierung von Methylmalonyl-CoA getriebene Bildung von ATP auf Schwierigkeiten, wenn man eine 1:1-Stöchiometrie zugrunde legt. Die freie Energie der Decarboxylierung ist nämlich mit etwa –30 kJ/Mol mindestens um ein Drittel zu niedrig, um unter physiologischen Bedingungen den Energiebedarf für die Knüpfung der Anhydridbindung im ATP decken zu können. Aus diesem Grund ist bei derartig niedrigen Energiespannen eine Substratketten-Phosphorylierung mit einer 1:1-Stöchiometrie ausgeschlossen. Bei einem chemiosmotischen Mechanismus kann dagegen die Energie der Decarboxylierung von mehr als einem Mol Methylmalonyl-CoA gespeichert und zur ATP-Synthese genutzt werden, wenn den beiden Energie-transformierenden Systemen eine unterschiedliche Stöchiometrie bezüglich des Kopplungs-Ions zugrunde liegt. Nehmen wir z. B. an, dass bei der Decarboxylierung von einem Mol Methylmalonyl-CoA zwei Mol Na^+-Ionen durch die Membran gepumpt werden und in dem gebildeten Gradienten die freie Energie von 30 kJ gespeichert wird. Bei Durchtritt von vier statt zwei Mol Na^+-Ionen durch die Membran würden unter Beibehaltung des elektrochemischen Potentials 60 statt 30 kJ freigesetzt, womit die Synthese von ATP energetisch möglich würde. Mit dem vektoriellen Kopplungsmechanismus kann daher die für die Synthese von einem Mol ATP erforderliche Energie aus dem Umsatz von mehr als einem Mol des Energie-liefernden Substrats bezogen werden. Anaerobe Bakterien können deshalb sogar dann wachsen, wenn aus dem Umsatz von einem Mol Substrat nicht genug Energie herauskommt, um damit ein ganzes Mol ATP zu bilden. Das kleinste Quantum biologisch nutzbarer Energie wird deshalb auch nicht von der ATP-Hydrolyse bestimmt, sondern von einem einzelnen Ion, das einen Gradienten über eine Membran bildet (P. Dimroth, 1987).

7 Transport-gekoppelte Konservierung von Decarboxylierungsenergie.

Anaerobe Bakterien können von der Decarboxylierungsenergie auch noch auf andere Weise profitieren. In dem Oxalat-vergärenden Bakterium *Oxalobacter formigenes* erfolgt die Aufnahme von Oxalat in die Zelle durch einen strikten Gegentausch gegen das Endprodukt Formiat (Bild 14) (V. Anantharam et al., 1989). Da dabei 2 negative Ladungen nach innen aber nur eine nach aussen transloziert werden, führt dies zum Aufbau eines innen negativen Membranpotentials, das den Bakterien als Triebkraft für die ATP-Synthese dient. Die exergone Decarboxylierung von Oxalat zu Formiat bewirkt, dass die intrazelluläre Konzentration an Oxalat relativ gering und die an Formiat relativ gross ist. Da auf der Aussenseite umgekehrte Konzentrationsverhältnisse herrschen, kann *Oxalobacter* mit Hilfe des Oxalat/Formiat-Austauschers ein Membranpotential aufbauen und somit Energie für die ATP-Synthese bereitstellen.

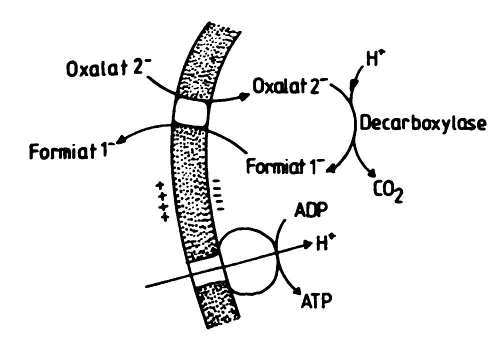


Bild 14 Energie-Matabolismus von *Oxalobacter formigenes*. Durch den elektrogenen Oxalat^{2-}:Formiat^{1-}-Austausch wird ein Membranpotential aufgebaut, das die Basis bildet für die ATP-Synthese mit einer Membran-gebundenen ATPase

Fig. 14 Energy metabolism of *Oxalobacter formigenes*. The electrogenic exchange of oxalate^{2-} for formate^{1-} builds up a membrane potential, which is the basis for ATP synthesis with a membrane-bound ATPase

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz der ungeheuer vielfältigen Stoffwechselleistungen der Bakterien sich nur wenige Mechanismen entwickelt haben, nach denen die Stoffwechselenergie konserviert und zur ATP-Synthese verwendet werden kann. Viele anaerobe Bakterien erzeugen ihr ATP ausschliesslich durch Substratkettenphosphorylierung. Andere benutzen statt dessen oder ausserdem eine Elektronentransportkette, durch die ein elektrochemischer Protonengradient aufgebaut wird, der der Membran-gebundenen ATPase als Triebkraft dient. Als drittes können anaerobe Bakterien sich der Decarboxylierungsenergie bedienen und diese entweder mit einer Membran-gebundenen Decarboxylase direkt in einen Na^+-Gradienten umwandeln, der dann für die ATP-Synthese benutzt wird; oder die Decarboxylierungsenergie kann dazu dienen, einen Konzentrationsgradienten von zweifach negativ geladenem Substrat und nur einfach negativ geladenem Produkt über die Membran aufzubauen. Durch Gegentausch dieser unterschiedlich geladenen Anionen entsteht daher ein Membranpotential, das von einer ATPase als Energiequelle für die Synthese von ATP verwendet wird.

Ich habe hier den Versuch unternommen, einen kleinen Einblick zu geben in das faszinierende Potential, das den anaeroben Bakterien zur Energiekonservierung zur Verfügung steht und das ihnen ein Wachstum unter Ausnutzung sehr geringer Energiespannen möglich macht. Ich bin davon überzeugt, dass die Beschäftigung mit der Energiekonservierung in anaeroben Bakterien nicht nur für kuriose Entdeckungen gut ist, sondern zu Erkenntnissen führt, die von generellem biologischen Interesse sind.

8 Literatur

Anantharam, V., Allison, M. J. and Maloney, P. C. (1989): Oxalate: formate exchange. J. Biol. Chem. *264*, 7244–7250.

Dimroth, P. (1987): Sodium ion transport decarboxylases and other aspects of sodium ion cycling in bacteria. Microbiol. Rev. *51*, 320–340.

Dimroth, P. (1990): Mechanisms of sodium transport in bacteria. Phil. Trans. R. Soc. Lond *B 326*, 465–477.

Hilpert, W., Schink, B. and Dimroth, P. (1984): Life by a new decarboxylation-dependent energy conservation mechanism with Na^+ as coupling ion. EMBO J. *3*, 1665–1670.

Kröger, A. (1987): ATP-Synthese bei anaeroben Bakterien mit energiearmen Substraten. Forum Mikrobiologie *10*, 487–493.

Laubinger, W. and Dimroth, P. (1987): Characterization of the Na^+-stimulated ATPase of *Propionigenium modestum* as an enzyme of the F_1F_0type. Eur. J. Biochem. *168*, 475–480.

Laubinger, W. and Dimroth, P. (1988): Sodium ion translocating ATP synthase of *Propionigenium modestum*. Biochemistry *27* 7531–7537.

Laubinger, W. and Dimroth, P. (1989): Proton pumping by the Na^+-ATPase of *Propionigenium modestum*. Biochemistry *28*, 7194–7198.

Thauer, R. K. (1988): Citric-acid cycle, 50 years on. Eur. J. Biochem. *176*, 497–508.

Wolin, M. J. and Miller, T. L. (1982): Interspecies hydrogen transfer: 15 years later. ASM News *48*, 561–565.

Prof. Dr. Peter Dimroth, Mikrobiologisches Institut der ETH Zürich, Schmelzbergstr. 7, CH-8092 Zürich

Buchbesprechung

Rosina Fechter und Gerhard Falkner: Weichtiere. Europäische Meeres- und Binnenmollusken. Steinbachs Naturführer. Mosaik Verlag GmbH, München. 1. Auflage 1990, 286 Seiten, 740 Farbphotos. DM 29.80.

Der Mosaik Verlag und der Herausgeber Günther Steinbach bieten in ihrer beliebten Serie «Steinbachs Naturführer» ein neues, 286 Seiten umfassendes Bestimmungsbuch an, das den europäischen Mollusken (Weichtiere), also Schnecken, Muscheln sowie Kopffüssern *(Cephalopoda)*, gewidmet ist. Es umfasst sowohl terrestrische sowie im Süss- und Meerwasser heimische Species, wobei aus der artenreichen Molluskenfauna europäischer Meeresküsten eine Auswahl jener Formen getroffen wurde, denen man im Litoral am ehesten begegnet. Dies gilt im besonderen Mass für die Cephalopoden, von denen lediglich je eine Species der Gattungen *Sepia, Octopus, Loligo, Sepiola* und *Argonauta* kurz besprochen werden. Andere Gattungen wie z. B. *Eledone* und *Ilex*, die man sehr viel öfters zu Gesicht bekommt als *Argonauta*, fehlen leider. Die kontinentalen Schnekken und Muscheln dagegen sind fast lückenlos aufgeführt. Erfreulich ist dabei die Tatsache, dass nicht nur die in Zentraleuropa vorkommenden Arten, sondern auch jene des Mittelmeerraumes, die uns weit weniger vertraut sind, berücksichtigt werden.

Jede Art und wenn erforderlich die verschiedenen Phänotypen einer solchen sind in Form einer photographischen Farbillustration bester Qualität dargestellt. Meistens handelt es sich um das lebende Tier in seiner natürlichen Umgebung. In anderen Fällen, die eine bildliche Erläuterung der für die Bestimmung wesentlichen Merkmale erfordern, sind die Gehäuse und Schalen in einer hiefür optimalen Position dargestellt. Stets auf der gegenüberliegenden Seite finden sich die textlichen Erläuterungen zu den abgebildeten Arten und Rassen. Sie vermitteln die deutschen und wissenschaftlichen Artbezeichnungen, Grössen, morphologische Besonderheiten, Lebensweise, geographische Verbreitung sowie die Einordnung der Art in die übergeordneten systematischen Kategorien. Leider sind die Abbildungshinweise im Text zu wenig auffällig, so dass der Leser, der die zu einer bestimmten Abbildung gehörende textliche Erläuterung sucht, etwelche Mühe bekundet. Ausserdem werden Angaben über Synonymien schmerzlich vermisst, ganz besonders deshalb, weil die wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen in vielen Fällen nicht mehr mit jenen übereinstimmen, welche in den von Studenten häufig benützten dichotomen Bestimmungsschlüsseln (Stresemann, Brohmer) verwendet werden. Zum Beispiel nennen die Autoren die gefleckte Weinbergschnecke *Cryptomphalus aspersus* (O. F. Müller 1774), während die gleiche Art noch öfters als *Helix aspersa* bezeichnet wird. Diese Neubenennungen mögen wohl bezüglich der nomenklatorischen Regeln korrekt sein, aber sie schaffen besonders bei Nicht-Fachleuten etwelche Verunsicherungen, wenn Synonyme verschwiegen werden. Es versteht sich von selbst, dass reich und gut bebilderte Bestimmungsbücher, wie dies für den neuen Steinbach-Naturführer zutrifft, einen dichotomen Bestimmungsschlüssel nicht erübrigen, ganz besonders dann nicht, wenn sich eine über jeden Zweifel erhabene Identifikation eines Objekts aufdrängt. Die beiden unterschiedlichen Konzepte können sich jedoch gegenseitig ergänzen: Das Bild erlaubt eine rasche Zuweisung des Objekts in eine bestimmte Familie oder sogar Gattung, der Bestimmungsschlüssel seinerseits wird dazu dienen, die grob vorgenommene Identifikation zu verifizieren.

Das Buch «Weichtiere» beschränkt sich nicht darauf, einzelne Arten bildlich und textlich zu charakterisieren, sondern gibt für jede der behandelten Artengruppen eine kurze Darstellung der für die Tiergruppe typischen Merkmale (Morphologie, Anatomie, Lebensweise). Das Buch schliesst mit einigen Angaben über die natürlichen Feinde der Weichtiere und deren Gefährdung durch den Menschen, mit einer sehr nützlichen Erläuterung von Fachausdrükken sowie mit Hinweisen auf andere, die Mollusken betreffende Schriften.

Die Autoren haben eine kleine, preiswerte Monographie über die europäischen Weichtiere geschaffen, die in die Bibliothek jedes Conchyliologen, jedes der einheimischen Fauna zugetanen Laien gehört und die auf verschiedenen Stufen des Biologie-Unterrichtes gute Dienste leisten wird.

Pierre Tardent

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/2: 93–104

Die wichtigsten Erkenntnisse zum Treibhaus-Problem

Fritz Gassmann, Paul Scherrer Institut, Villigen PSI

Die Physik des Treibhauseffektes ist mit Hilfe einfacher Relationen qualitativ und quantitativ begreifbar. Es lassen sich damit die wissenschaftlichen Schlussfolgerungen der Weltklimakonferenz 1990, die mit dem IPCC-Bericht identisch sind, nachvollziehen sowie deren Schwachstellen diskutieren. Insbesondere könnte sich herausstellen, dass die Prognosen über die kommende Klimaveränderung nach oben korrigiert werden müssen. Aber auch ohne eine solche Verschärfung des Problems wird aufgrund paläoklimatischer Erkenntnisse klar, dass es sich um eine drastische Veränderung des globalen Klimasystems in ungeheuer kurzer Zeit handelt. Weiter legt der Verlauf der atmosphärischen Kohlendioxid- und Methankonzentrationen sowie der Temperatur über die letzte Eiszeit hinweg nahe, dass das Klimasystem instabil ist und empfindlich auf kleine Störungen reagiert.

Es ist trotz vieler wissenschaftlicher Unsicherheiten heute klar, dass sich der Planet Erde in einer entscheidenden Übergangsphase befindet, die seine Entwicklung in eine lange Zukunft hinein prägen wird. Ob dieser durch den Menschen verursachte Prozess ihm selbst und der ganzen Biosphäre vorteilhaft sein wird, ist äusserst fraglich.

The Most Important Findings Related to the Greenhouse Problem

The physical basis of the greenhouse effect can easily be understood qualitatively and quantitatively by a few simple relations. The scientific conclusions of the World Climate Conference 1990, which are identical with the IPCC report, can be reproduced and critically analysed. We must be aware that the long range climate forecasts probably have to be corrected towards higher temperatures. Even without this possible intensification of the problem, we have to judge future climate change on the paleoclimatological background as dramatic in respect to its amplitude and also to its rate of change. Atmospheric concentrations of carbon dioxide and methane together with temperature variations during the last ice age suggest an instable global climate system amplifying small perturbations.

In spite of many scientific uncertainties, it is clear today, that planet earth is going to execute a major transient having important implications on its development for a very long time. If this anthropogenic process will be in favour of mankind and the whole biosphere is uttermost questionable.

1 Einleitung

Der Treibhauseffekt wurde bereits zu Beginn des vorigen Jahrhunderts durch den berühmten Mathematiker J.-B. J. Fourier postuliert (J.-B. J. Fourier, 1824). Vor rund einhundert Jahren untersuchte S. Arrhenius den Effekt einer CO_2-Verdoppelung in der Erdatmosphäre auf die mittlere Globaltemperatur (die Motivation für seine Arbeiten wurde jedoch nicht durch mögliche anthropogene Veränderungen des Treibhauseffektes gegeben, sondern durch die Frage nach den Ursachen der Eiszeiten; er erkannte jedoch, dass die durch die Industrie emittierte Kohlenstoffmenge den globalen Kohlenstoffkreislauf entscheidend verändern könnte) und errechnete einen mittleren Wert des Klima-Sensitivitäts-*parameters von 5,4 K (S.* Arrhenius, 1896), der erstaunlich nahe am heute

akzeptierten Wertebereich von 1,5–4,5 K liegt (IPCC, 1990). Ein Vergleich der Bestimmung dieses Schlüsselparameters – einmal auf der Basis rudimentärer Kenntnisse über globale geophysikalische Zusammenhänge von Hand durchgeführt und einmal auf der Basis von nur noch mit grossen Rechenanlagen bewältigbaren Datenmengen erarbeitet – wirft bereits ein erstes Licht auf die Komplexität des Problems und legt zugleich die Frage nach dem Erkenntnisfortschritt nahe.

Im vorliegenden Bericht soll versucht werden, den heutigen Stand der Forschung zu charakterisieren sowie die wesentlichen Erkenntnisse aufzuzeigen. Ob diese für die Durchsetzung einschneidender Massnahmen ausreichen? Dieser politisch brisanten Frage soll abschliessend eine Antwort vom wissenschaftlich-philosophischen Standpunkt gegeben werden.

2 Physikalische Grundlagen des Treibhauseffektes

Die Sonne ist die einzige klimarelevante Energiequelle für das Raumschiff Erde. Sie liefert einen sehr gleichbleibenden Energiestrom $Q = 1367{,}5 \pm 0{,}5$ W/m^2 (gemessen bei einem mittleren Erdbahnradius), wovon durch Wolken 20%, durch Aerosole und Luftmoleküle 6% und von der Erdoberfläche 4% in den Weltraum reflektiert werden. Die planetare Albedo beträgt also $\alpha = 30\%$, und die durch das System Atmosphäre-Erdoberfläche absorbierte mittlere kurzwellige Strahlungsstromdichte (im Wellenlängenbereich 0,3–7 μm) ist demzufolge $Q\,(1-\alpha)/4 \approx 240\ W/m^2$. Der Faktor ¼ rührt daher, dass die Strahlungsstromdichte $Q\,(1-\alpha)$ nur auf die der Sonne zugewandte Kreisscheibe πR^2 (R = Erdradius) wirkt, währenddem die gesamte Erdoberfläche $4\pi R^2$ misst. Das Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn die thermische Infrarotausstrahlung σT^4 (im Wellenlängenbereich 3–50 μm) gleich der mittleren kurzwelligen Einstrahlung wird:

$$Q(1-\alpha)/4 = \sigma T^4 \tag{1}$$

σ ist die Stefan-Boltzmannsche Konstante ($\sigma = 5{,}6697 \cdot 10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4}$). Die effektive Gleichgewichts-Strahlungstemperatur T wird gemäss dieser Beziehung 255 K oder – 18° C.

Aufgrund der vertikalen Verteilung der wichtigsten natürlichen Absorber infraroter Strahlung, die nach dem Kirchhoffschen Emissionsgesetz auch für die Infrarotausstrahlung verantwortlich sind, nämlich in erster Linie Wasserdampf und Kohlendioxid, lässt sich die Höhe der mittleren Strahlungsschicht auf rund 5,5 km über dem Meeresniveau berechnen (J.F.B. Mitchell, 1989). Dies schicht mit Strahlungstransportmodellen, die gleichzeitig die Ausstrahlung chiedener Luftschichten sowie die Absorption von Infrarotstrahlung bei n Durchquerung bestimmen, wobei die komplexe Struktur der Absorp- ıden sowie die Wolken berücksichtigt werden müssen. Allein die Wol-

ken, die im infraroten Bereich nahezu wie schwarze Körper emittieren, tragen gut die Hälfte zum mit Hilfe von Satelliten extraterrestrisch messbaren Strahlungsstrom bei. Die Wassermoleküle übernehmen deshalb die Hauptrolle bei der Festlegung der Höhe der mittleren Strahlungsschicht, gefolgt von Kohlendioxid an zweiter Stelle sowie weiteren Treibhausgasen (Methan, Fluorchlorkohlenwasserstoffe = FCKW, troposphärisches Ozon und Lachgas = Distickstoffoxid) an dritter Stelle. Die Hauptkomponenten der Atmosphäre, Stickstoff und Sauerstoff, spielen gar keine Rolle, weil die symmetrischen N_2- und O_2-Moleküle kein Dipolmoment aufweisen, das mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirken könnte.

Die Lufttemperatur auf der Höhe der mittleren Strahlungsschicht beträgt nach der Standard-Atmosphäre –20,75° C, liegt also sehr nahe bei der effektiven Gleichgewichts-Strahlungstemperatur von –18° C. Zufolge des intensiven vertikalen Massenaustausches innerhalb der Troposphäre (Konvektion) stellt sich ein mittlerer vertikaler Temperaturgradient von –6,5 K/km ein, der stabiler ist als derjenige für trockene Luft (–9,7 K/km), weil die in einem aufsteigenden Luftpaket frei werdende Kondensationswärme dessen Temperatur langsamer absinken lässt. Durch diesen Austauschprozess werden die Temperaturen aller Troposphärenschichten eng mit der Temperatur in Bodennähe verkoppelt, die –20,75 + 5,5 * 6,5 = 15° C wird.

Vielfach wird die Differenz von 33 K zwischen der bodennahen Lufttemperatur (15° C) und der effektiven Gleichgewichts-Strahlungstemperatur (–18° C) als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet, was nicht ganz korrekt ist, denn ohne Wasserdampf und Kohlendioxid würde das Strahlungsgleichgewicht (1) für eine planetare Albedo von ≈ 40% (für trockenen Sand oder Meereis) eine Oberflächentemperatur von –28° C oder für $\alpha \approx 6{,}7\%$ (Mond) eine solche von +1° C ergeben. Je nachdem, wie man sich die Oberfläche eines treibhausfreien Vergleichsplaneten vorstellt, variiert die Grösse des natürlichen Treibhauseffektes in weiten Grenzen. Auf jeden Fall muss der natürliche Treibhauseffekt aber neben der Existenz von Wasser als entscheidend für die Möglichkeit der biologischen Evolution gewertet werden.

Durch eine anthropogene Erhöhung der Konzentrationen infrarotabsorbierender Spurengase wird die Troposphäre opaker für Wärmestrahlung und demzufolge verschiebt sich die mittlere Strahlungsschicht nach oben in eine Region mit tieferer Temperatur. Dadurch wird die Infrarotemission der Troposphäre verkleinert, so dass das Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Ausstrahlung gestört wird. Für alle wichtigen Treibhausgase wurde der entsprechende Netto-Energiezustrom zur Troposphäre im Tropopausenniveau ΔF mit Hilfe von Strahlungstransportmodellen bestimmt. Für Kohlendioxid lautet der Zusammenhang zwischen ΔF und der Konzentration C näherungsweise (IPCC, 1990)

$$\Delta F = 6{,}3 \ln C/C_0 \quad (\Delta F \text{ in } W/m^2) \tag{2}$$

Für eine bei den meisten Untersuchungen zugrunde gelegte Verdoppelung des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes ($C/C_0 = 2$) wird $\Delta F_2 = 4.4$ W/m². Dieser zusätzliche Wärmestrom heizt die Troposphäre um $\Delta T_{2,0}$ auf ($\Delta T_{2,0}$ = primäre Erwärmung ohne Rückkoppelungseffekte), bis die effektive Strahlungstemperatur T wieder ihren Gleichgewichtswert (−18° C) erreicht und ΔF_2 kompensiert

$$\Delta F_2 = \Delta(\sigma T^4) \approx 4\sigma T^3 \Delta T_{2,0} \qquad (3a)$$

woraus folgt

$$\Delta T_{2,0} = \Delta F_2/(4\sigma T^3) = 1{,}2 \text{ K} \qquad (3b)$$

Durch die oben erwähnte konvektive Koppelung der verschiedenen Troposphärenschichten wird die Aufheizspanne $\Delta T_{2,0}$ auch an die Oberflächenschicht übertragen. Durch Veränderungen des troposphärischen Temperaturgradienten kann die Erhöhung der Oberflächentemperatur davon etwas abweichen, was hier jedoch einfachheitshalber vernachlässigt werden soll.

Eine Reihe von Rück- und Gegenkoppelungseffekten modifiziert diese primäre Temperaturerhöhung $\Delta T_{2,0}$. So ist zu erwarten, dass die Wasserdampfkonzentration innerhalb einer sich erwärmenden Troposphäre zunimmt und den Treibhauseffekt verstärkt. Zusätzlich wird durch das Abschmelzen von Meer- und Landeis die Albedo verkleinert, was den Treibhauseffekt ebenfalls verstärkt. Ob Veränderungen der Häufigkeit und Struktur der Wolken auf Klimaveränderungen verstärkend oder dämpfend wirken, ist wohl unsere entscheidendste Kenntnislücke im Zusammenhang mit der anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffektes und verursacht den grossen Unsicherheitsbereich in den heutigen Prognosen.

Gemäss Rechnungen mit verschiedenen dreidimensionalen Klimamodellen dominieren die positiven Rückkoppelungseffekte und verstärken die primäre Erwärmung $\Delta T_{2,0}$ um einen Faktor $\beta \approx 2...4$, so dass der sogenannte Klimasensitivitätsparameter $\Delta T_2 = \beta\ \Delta T_{2,0}$ nach diesen Modellen einen Wert von etwa 2,4...4,8 K erhält. Rechnungen mit eindimensionalen Strahlungs-Konvektionsmodellen, die den Zusammenhang zwischen den Reflexionseigenschaften und dem Wassergehalt der Wolken wesentlich detaillierter berücksichtigen, als dies mit dreidimensionalen Zirkulationsmodellen möglich ist, legen jedoch einen Wert des Rückkoppelungsfaktors deutlich unterhalb von $\beta = 2$ nahe. Aus diesem Grunde kann der allgemein akzeptierte Bereich des Klimasensitivitätsparameters ΔT_2 von 1,5...4,5 K («beste Schätzung» 2,5 K) vorläufig beibehalten werden (IPCC, 1990).

er Klimasensitivitätsparameter bezieht sich auf den stationären Gleichgetszustand einer Atmosphäre mit doppeltem vorindustriellem Kohlendihalt (2*280 = 560 ppmv). Aufgrund der engen Kopplung der Troposphä-
Ozeanen gestaltet sich der dynamische Ablauf der Erwärmung jedoch

nicht einfach proportional zum Kohlendioxidgehalt.

Erstens wird die Erwärmung durch die thermische Trägheit der Ozean-Oberflächenschicht verzögert (die Wärmekapazität der Atmosphäre entspricht derjenigen von 2,5 m Wasser und kann vernachlässigt werden). Die dynamische Gleichung für die mittlere Globaltemperatur lautet für eine Störung ΔF

$$c\,\dot{T} = Q(1-\alpha)/4 - \sigma T^4 + \Delta F \tag{4a}$$

oder formuliert mit Hilfe der Abweichung ΔT von der Gleichgewichtstemperatur und mit Berücksichtigung des Rückkoppelungsfaktors β sowie des Tiefenwasserbildungsfaktors χ (siehe unten)

$$c\Delta\dot{T} = \Delta F(1-\chi) - 4\sigma T^3 \Delta T/\beta \tag{4b}$$

Bei einer sprunghaft einsetzenden und hernach konstanten Störung ΔF (engl. climate forcing) lautet die Lösung

$$\Delta T(t) = \Delta F(1-e^{-\lambda t/\beta c})\beta(1-\chi)/\lambda \tag{5}$$

wobei $\lambda = 4\sigma T^3 = 3{,}8\ Wm^{-2}K^{-1}$
β = Rückkoppelungsfaktor
χ = Bruchteil der an die Tiefsee abgegebenen Wärme
c = Wärmekapazität der Meeresoberflächenschicht (rund 75m) $\approx 3\cdot10^8 Jm^{-2}K^{-1}$

Für $\beta = 1{,}2...4$ ergibt sich eine Zeitkonstante $\beta c/\lambda$ von 3...10 Jahren, um die die Erwärmung verzögert wird.

Zweitens muss ΔF mit einem Faktor $(1-\chi)$ multipliziert werden, weil durch die Tiefenwasserproduktion (vorwiegend im Nordatlantik) etwa ein Drittel der an die Meeresoberfläche übertragenen Wärme für längere Zeit (etwa ein Jahrtausend) an die Tiefsee abgegeben wird ($\chi \approx 0{,}3$).

Mit Hilfe der Relationen (2) und (5) kann die mittlere globale Temperaturerhöhung für vorgegebene Emissionsszenarien abgeschätzt werden. Nach dem «Business as usual»-Szenario (IPCC, 1990), das durch intensivierten Kohleabbau, bescheidene Sparmassnahmen, den Abbrand aller tropischen Wälder und uneingeschränkter landwirtschaftlicher Methan- und Lachgasemissionen charakterisiert wird, muss mit einer Verdoppelung der äquivalenten Kohlendioxidkonzentration (zur Vereinfachung kann man das totale Forcing ΔF der verschiedenen Treibhausgase in Kohlendioxidäquivalenten ausdrücken; dies ist diejenige Kohlendioxidkonzentration, die dasselbe Gesamtforcing ergeben würde) in der Atmosphäre bis etwa zum Jahre 2017 und mit einer Verfünffachung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet werden. Daraus resultiert nach (2) $\Delta F = 10\ W/m^2$ und mit $\beta = 2{,}2$ (entspricht einem mittleren Klimasensitivitätsparameter von 2,5 K) und $\chi = 0{,}3$ wird ΔT im Jahre 2100 nach (5) rund 4 K, was mit den im

IPCC-Bericht wiedergegebenen 4,3 K gut übereinstimmt. Der Verzögerungsterm in (5) wurde für diese Abschätzung vernachlässigt, da die sich ergebende Zeitkonstante von rund 5 Jahren gegenüber der betrachteten Zeitspanne nicht von Bedeutung ist.

Es ist wichtig festzustellen, dass diese Abschätzung auf einem keineswegs utopischen Szenario beruht, denn weder die vorhandenen Kohlevorräte (diese könnten den vollständigen heutigen Primärenergieverschleiss der Menschheit von ca. 13 TW noch über mindestens 400 Jahre decken) noch die Nahrungsmittelproduktion wirken in diesem Zeitrahmen prinzipiell limitierend.

Drittens muss zusätzlich zu den soeben erläuterten Prozessen mit Rückkoppelungen gerechnet werden, die weder im Sensitivitätsparameter noch sonstwie in heutigen Modellen berücksichtigt sind. So wird eine erwärmte Meeresoberflächenschicht weniger Kohlendioxid aufnehmen können, was zu einem noch schnelleren Anstieg der atmosphärischen Konzentration führen wird. Dieser Effekt könnte weiter verstärkt werden durch eine Stabilisierung der Meeresoberflächenschicht durch erhöhte Wassertemperaturen und eine – via Veränderungen der Meereszirkulation und der Niederschlagsverteilung – verringerte Salinität, wodurch die Tiefenwasserbildung reduziert würde. Dadurch könnte sowohl der Abtransport von Kohlendioxid wie auch von Wärme in die Tiefsee stark vermindert werden.

Viele offene Fragen betreffen auch die Reaktionen der Biosphäre sowohl auf dem Land wie in der Meeresoberflächenschicht. Einem möglichen Kohlendioxid-Düngungseffekt, der verstärktes Wachstum und damit eine Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre hervorrufen könnte, stehen Adaptationsprozesse oder sogar eine Freisetzung grösserer Methanmengen aus feuchten Böden (Sümpfe, Reisfelder) oder auftauenden Permafrostgebieten gegenüber. Obwohl die damit zusammenhängenden Prozesse noch kaum verstanden werden, liegt die Vermutung nahe, dass ihre Summe den Treibhauseffekt eher verstärken als abschwächen wird (IPCC, 1990).

Wiederholt man die oben angegebene Schätzung der mittleren Erhöhung der Globaltemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts etwas verantwortungsvoller, wie dies für ein irreversibles globales Experiment angezeigt wäre, müsste man nicht die «beste», sondern eine vorsichtige Schätzung des Rückkoppelungsfaktors β verwenden, die eher bei ca. 3 liegen dürfte. Dieser Wert wird auch durch paläoklimatische Untersuchungen gestützt (C. Lorius et al., 1990). Weiter müsste die Möglichkeit der Verminderung der Tiefenwasserbildung sehr ernst genommen werden, was sich in einer Verkleinerung von χ auf etwa die Hälfte ($\chi = 0{,}15$) niederschlagen könnte. Schliesslich müssten die erwähnten, die Stoffkreisläufe betreffenden Rückkoppelungen in Betracht gezogen werden, die eine verstärkte Zunahme der äquivalenten Kohlendioxidkonzentration nach sich ziehen würden. Eine Multiplikation des vorindustriellen Kohlendioxidgehaltes mit dem Faktor 6–7 statt 5 wäre deshalb angezeigt. Mit diesen keineswegs übervorsichtigen Schätzwerten ergäbe sich eine Temperaturzunahme bis ans Ende des kommenden Jahrhunderts von rund 8 K anstelle von 4 K,

was oberhalb der «hohen Schätzung» von 6,3 K im IPCC-Bericht liegt. In Anbetracht der globalen Dimension, der Einmaligkeit und Irreversibilität des zu erwartenden Klimaereignisses sowie der damit verbundenen Unwägbarkeiten und Risiken müssen die oben erwähnten 8 K nicht als eine «hohe Schätzung», sondern als eine die Verantwortung der Wissenschafter gegenüber unserem Planeten miteinbeziehendes bestes Wissen betrachtet werden, das dem politischen Handeln zugrunde gelegt werden muss.

3 Paläoklimatologische Erkenntnisse

Das Klima ist weder eine absolute noch eine konstante Grösse. Anthropogene Veränderungen können deshalb nur durch einen Vergleich mit in der Vergangenheit aufgetretenen natürlichen Schwankungen beurteilt und gewertet werden. Im Bild 1 ist der Verlauf der mittleren Globaltemperatur seit der Zeit der ersten Landpflanzen (Kambrium, 570 Mio. Jahre v.h.) über einer logarithmischen Zeitachse dargestellt. Die Temperaturangaben stammen nur für die letzten zwei Jahrhunderte aus direkten Messungen. Weiter zurückliegende Temperaturen wurden mit Hilfe indirekter Methoden abgeleitet (Mittelalter: Berichte über Zehntenabgaben, Weinlesedaten, Schneetage, Gletschervorstösse etc., früher: Isotopenverhältnisse in Eisbohrkernen und Sedimenten, Pollenanalysen, Dendrochronologie). Auch wenn bezüglich weit zurückliegender Temperaturangaben Unsicherheiten sowohl in der Datierung wie auch in ihrer globalen Repräsentativität und ihrer Genauigkeit bestehen, so ist doch festzustellen, dass sich vor allem im vergangenen Jahrzehnt aus den verschiedensten Methoden ein immer konsistenteres Bild des Temperaturverlaufes seit der letzten Zwischeneiszeit (Eem) ergeben hat. Es darf heute als gesichert betrachtet werden, dass im Holozän-Klimaoptimum vor ca. 5000–6000 Jahren die mittlere Globaltemperatur 1–1,5 K höher lag als zu Beginn unseres Jahrhunderts und dass die letzte Zwischeneiszeit vor rund 125 000–130 000 Jahren mit 1–2 K höherer Temperatur die wärmste Zeit der vergangenen 200 000 Jahre war. Wahrscheinlich war diese Zeit die wärmste im ganzen Quartär (bis ca. 2 Mio. Jahre v.h.) und wurde zum letzten Mal im Pliozän-Optimum (ca. 3,3–4,3 Mio. Jahre v.h.) überboten, als die Mitteltemperatur rund 3 K höher lag als zu Beginn unseres Jahrhunderts. Temperaturen, wie sie uns bis zum Ende des kommenden Jahrhunderts bevorstehen, sind auf dem Globus vermutlich das letzte Mal im Miozän (ca. 9–25 Mio. Jahre v.h.) aufgetreten, in einer Zeit, wo sich der Vorfahre des Menschen noch nicht vom Ahnen der Schimpansen und der Gorillas abgetrennt hatte. Noch wärmer, wie dies im 22. Jahrhundert bevorstehen könnte, dürfte es zum letzten Mal in der späteren Kreidezeit (ca. 101–67 Mio. Jahre v.h.) gewesen sein, als Dinosaurier die Erde bevölkerten. Das Gewicht dieser Erkenntnisse aus der Paläoklimatologie darf auf keinen Fall als gering eingestuft werden, da diese die Brisanz der heutigen Situation am deutlichsten ausdrücken: Wir sind daran, das globale Klima in nur 100–200 Jahren in einen Zustand zu verschie-

ben, der innerhalb der biologischen Evolutionszeit des Menschen nie vorhanden war. Die zu erwartenden anthropogenen Klimaveränderungen müssen deshalb auf dem Hintergrund paläoklimatischer Erkenntnisse als äusserst schnell und in ihrer Amplitude ungeheuer gross beurteilt werden.

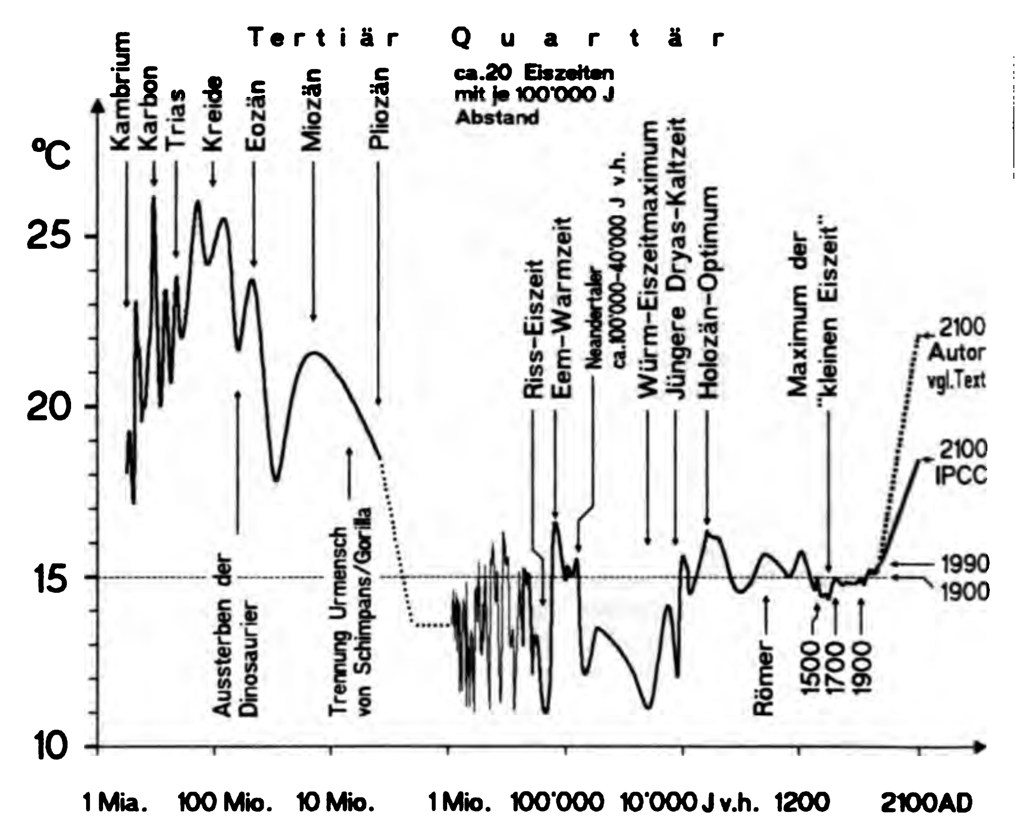


Bild 1 Verlauf der globalen Mitteltemperatur über die letzten 600 Mio. Jahre (Phanerozoikum) sowie mögliche Zunahme bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts (Daten nach M.I. Budyko, 1988, und IPCC, 1990, teilweise verändert und ergänzt durch weitere Quellen).

Fig. 1 Diagram of global mean temperature variations over the past 600 million years (Phanerozoicum) and possible increase until the end of the next century.

Neben dieser Beurteilungsgrundlage für Klimaveränderungen liefert die Paläoklimatologie auch gewichtige Hinweise zur Klimadynamik. Messungen der Kohlendioxid- und Methangehalte in Lufteinschlüssen des Vostok-Eisbohrkerns aus der Antarktis (J.M. Barnola, 1987) zeigen eine hohe Korrelation mit Temperaturbestimmungen aufgrund der Isotopen-Methode. Regressionsanalyen ergeben einen Wert für den Rückkoppelungsfaktor β um etwa 3 (Lorius et ., 1990), der im oberen Bereich des oben erwähnten Unsicherheitsintervalles

liegt. Die Korrelation zwischen Treibhausgasen und Temperatur gibt auch einen Hinweis darauf, dass die Rolle der Treibhausgase im Zusammenhang mit den Eiszeiten die eines Verstärkers war und mitgeholfen hat, die unbedeutenden Temperaturschwankungen, die durch die kleinen Veränderungen der saisonalen Sonneneinstrahlung aufgrund veränderter Erdbahnparameter hervorgerufen wurden, zu verstärken. Das Klimasystem scheint demnach so gestaltet zu sein, dass Temperaturschwankungen durch natürliche Prozesse, die den atmosphärischen Gehalt von Kohlendioxid und Methan steuern, verstärkt werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass das globale Klimasystem instabil ist und empfindlich auf kleine Störungen reagiert. Die Tatsache, dass bis heute kein Modell existiert,

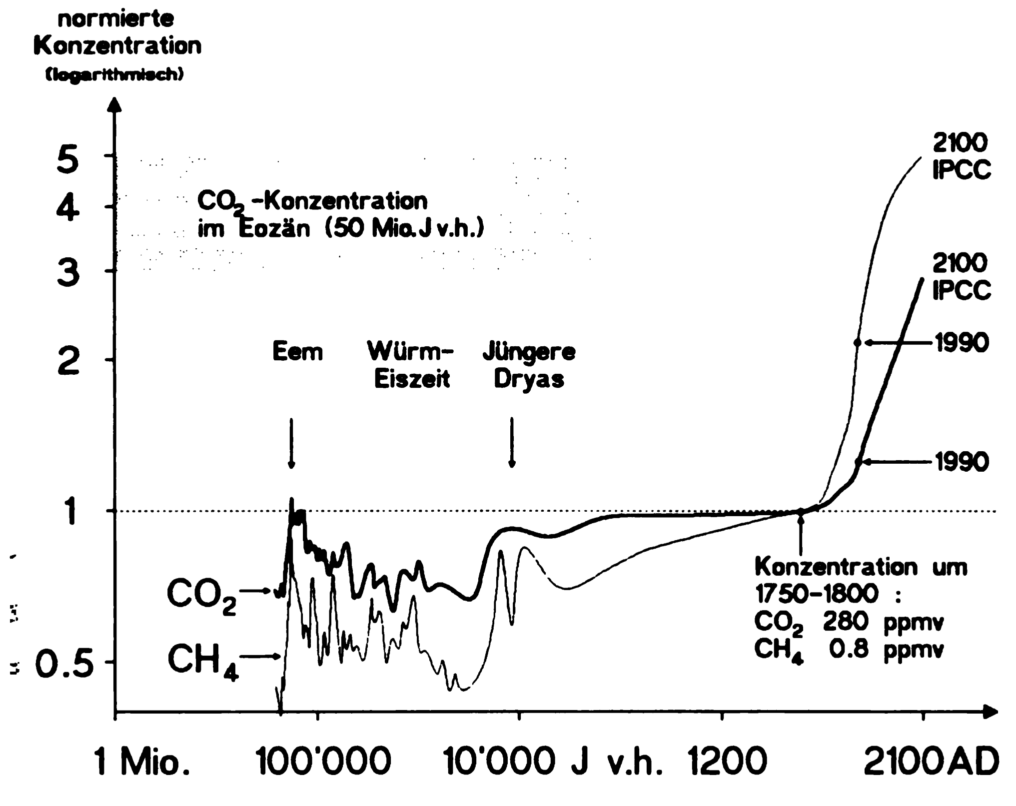


Bild 2 Verlauf der atmosphärischen Kohlendioxid- und Methankonzentration über die letzten 160 000 Jahre sowie mögliche Zunahme bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts. Die Konzentrationen wurden auf vorindustrielle Werte normiert; die logarithmische Aufzeichnung liefert für Kohlendioxid zum «climate forcing» proportionale Amplituden (Daten nach J. Chappellaz et al., 1990, und IPCC, 1990).

Fig. 2 Diagram of atmospheric carbon dioxide- and methane concentrations over the past 160 000 years and possible increase until the end of the next century. The concentrations have been normalized to preindustrial values; the logarithmic display shows climate forcing proportional amplitudes *for carbon dioxide.*

das die Eiszeiten befriedigend simulieren und damit erklären kann, zeigt aber auch, dass unsere wissenschaftlichen Kenntnisse über wichtige Teilprozesse des Klimasystems ungenügend sind. Es ist deshalb nicht auszuschliessen, dass Prozesse gefunden werden, die unsere heutigen Prognosen wesentlich korrigieren könnten, und diese Korrekturen dürften eher nach oben als nach unten zeigen.
Ein drittes wichtiges Resultat der Erforschung von Klimaarchiven ist die Grösse der Schwankungen des atmosphärischen Kohlendioxid- und Methangehaltes. Aus Messungen an Eisbohrkernen aus Gletschern sowie aus der Arktis und Antarktis kann der vorindustrielle Gehalt (um ca. 1750) auf 280 respektive 0,8 ppmv bestimmt werden. Ein Vergleich mit den heutigen (1990) Werten von 353 und 1,72 ppmv zeigt den markanten Anstieg um 26 resp. 270% (Bild 2), der in Anbetracht des etwa konstanten Verlaufes über die 10 000 Jahre der Nacheiszeit keiner vom Menschen unabhängigen Ursache zugeschrieben werden kann. Hierzu kommt noch, dass die Konzentrationen in der letzten Zwischeneiszeit vor 125 000–130 000 Jahren wiederum etwa den vorindustriellen Werten entsprechen. Obwohl weiter zurückliegende Angaben über Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre immer unsicherer werden, muss aufgrund heutiger Kenntnisse angenommen werden, dass Konzentrationen, wie wir sie am Ende des kommenden Jahrhunderts vorfinden könnten, zum letzten Mal vor rund 50 Mio. Jahren im Eozän aufgetreten sind (M.I. Budyko et al., 1988).
Ein viertes Resultat betrifft die Zeitspanne von rund 1 Mia. Jahren (Präkambrium), die gebraucht wurde, um die fossilen Energievorräte anzulegen, die wir im Begriffe sind, innerhalb weniger Jahrhunderte zu verbrennen und dadurch in die Atmosphäre, woher sie stammen, zurückzuführen. Der Vergleich dieser Aufbau- und Abbauperioden zeigt, dass die Abbaugeschwindigkeit heute rund zweimillionenmal schneller vor sich geht als die Aufbauprozesse. Mit anderen Worten, wir verbrauchen heute die in 1000 Jahren erzeugten Kohle- und Öllager innerhalb von etwa 4 Stunden, und in einigen Jahrzehnten wird dies nur noch 1–2 Stunden dauern!

4 Versuch einer Lagebeurteilung des Planeten Erde

Zu den oben erläuterten Tatsachen, die die kritische Lage des Planeten in kaum zu überbietender Deutlichkeit darstellen, kommt das Tabu der schrankenlosen Vermehrung der Bevölkerung (Bild 3), das den Blick selbst vieler Wissenschafter für die wesentlichen Zusammenhänge verschleiert und zu beschönigenden Prognosen verleitet. Es ist eine unbestreitbare Tatsache, dass die Erdbevölkerung pro Stunde um 11 400 Individuen oder rund 100 Mio. pro Jahr [illegible]nimmt. Allein der Zuwachs innerhalb von 2 Jahren entspricht der gesamten [illegible]ltbevölkerung zur Zeit der römischen Hochkultur vor 2000 Jahren. Heute [illegible]rd drei Viertel der Energie von rund einem Viertel der Menschheit in An[illegible] genommen, ein Missverhältnis von einem Faktor 9, das aufgrund der

Möglichkeiten der modernen Nachrichtenübermittlung und Mobilität höchstens noch für kurze Zeit aufrechtzuerhalten ist. Ein «Aufholen» der Entwicklungsländer bis zum Energieverschleiss der Industrieländer, was vielfach als die einzige Möglichkeit zur Herabsetzung der Geburtenrate angesehen wird, würde jedoch eine Zunahme des Weltenergieverbrauches um einen Faktor 3 bedeuten, falls die Bevölkerungszahl augenblicklich stabilisiert würde. Aufgrund der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts prognostizierten 14 Mia. Erdenbewohner würde jedoch der Energieverbrauch nach diesen Überlegungen um etwa einen Faktor 8 von 13 auf rund 100 TW ansteigen und das oben erwähnte «Business as usual»-Szenario um mindestens das Doppelte übertreffen. Ein wesentlich vergrössertes Energieangebot kann deshalb kaum als ein taugliches Mittel für die unbedingt notwendige Stabilisierung der Weltbevölkerung betrachtet werden. Langfristig haltbar trotz der ökologisch-ökonomischen Konsequenzen einer drastischen Klimaverschiebung wird einzig eine Kombination von Nord-Süd-Ausgleich des Energieangebotes, Stabilisierung der Erdbevölkerung auf einen Wert deutlich unterhalb von 10 Mia. und deutlichem Rückgang des Austosses von Treibhausgasen, in erster Linie von Kohlendioxid, durch die Industrieländer sein. Da kein rascher Durchbruch in der Kernfusion und keine genügend rasche Einführung der Solartechnik im grossen Massstab vorstellbar ist, bleibt für die Industrieländer nur der Ausweg einer markanten Herabsetzung des Energieverbrauches pro Kopf der Bevölkerung auf etwa die Hälfte im Laufe der kommenden Jahrzehnte bei gleichzeitiger massiver Unterstützung der Entwicklungsländer bei der Erreichung der ersten beiden Ziele (z.B. durch Schuldenerlass, Transfer emissionsarmer und energieeffizienter Technologie, Familienplanung). In Anbetracht dieser überwältigenden Aufgabe fällt die Antwort auf die Fragen nach der Verwendung der diskutierten und dringend notwendigen Kohlendioxid-Steuer von ca. 20% relativ leicht. Wichtig wäre jedoch anschliessend eine sukzessive Anhebung dieser Lenkungssteuer auf 100 bis 200%, einerseits um den gewünschten Spareffekt zu erzielen (dieses Ziel wird mit nur 20% nicht erreicht, da die Preiselastizität z.B. bei Benzin nur etwa ¼ beträgt; dies bedeutet einen anfänglichen Verbrauchsrückgang um ca. 5%, der jedoch durch die Verbrauchszunahme in wenigen Jahren wieder wettgemacht wird),

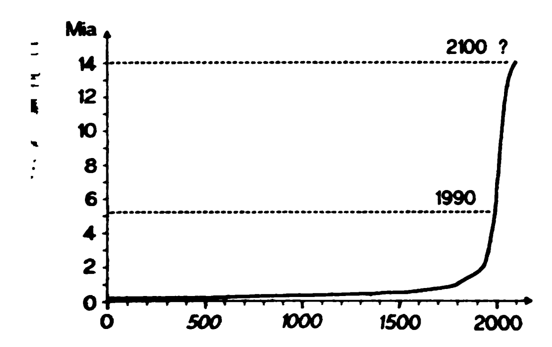


Bild 3 Die überexponentielle (hyperbolische) Zunahme der Erdbevölkerung innerhalb der vergangenen zwei Jahrtausende (Daten nach National Geographic, 1988).

Fig. 3 Overexponential (hyperbolic) growth of the world population over the past two millenia.

andererseits, um die Marktchancen der Solartechnologie zu verbessern und letztendlich, um genügend Geld für die Finanzierung der bevorstehenden immensen Aufgabe bereitstellen zu können (vgl. auch F. Gassmann, R. Weber, 1989).

Ob genügend gesichertes Wissen bereits heute vorhanden ist, um die erwähnten Massnahmen verantworten zu können? Diese Frage muss mit der Gegenfrage konfrontiert werden, ob es zu verantworten ist, mit sehr unvollständigen Kenntnissen ein einmaliges, irreversibles, globales «Klimaexperiment» durchzuführen, dessen Ausgang sich mit hoher Wahrscheinlichkeit verheerend auf die Biosphäre auswirkt und in Anbetracht der bestehenden Waffenarsenale äusserst gefährliche Konsequenzen für das Überleben der Menschheit haben dürfte. Also eine Einbusse von Bequemlichkeit auf der einen, eine existentielle Bedrohung auf der anderen Seite.

Schlussbemerkung: Ich habe die Brandrodung der tropischen Regenwälder im Zusammenhang mit globalen Klimaveränderungen nicht erwähnt, weil der atmosphärische Kohlendioxidgehalt bei deren vollständiger Verbrennung um nur 35–60 ppmv (IPCC, 1990) ansteigen würde, was im Lichte einer Multiplikation des äquivalenten Kohlendioxidgehaltes mit einem Faktor 5–7 nicht relevant ist. Der heute betriebene Raubbau an den artenreichsten Ökosystemen, die wir auf unserem Planeten finden, ist jedoch in der 600 millionenjährigen Evolutionsgeschichte der Land-Biosphäre das vermutlich schlimmste Extinktionsereignis, das je stattgefunden hat, und dies ist durch keine Argumente zu rechtfertigen.

5 Literatur

Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, Phil. Mag. Ser. *5*, (251), 237–276.

Barnola, J. M. et al. (1987): Vostok ice core provides 160 000-year record of atmospheric CO_2, Nature *329*, 408.

Budyko, M. I. et al. (1988): Global Climatic Catastrophes, Springer, New York.

Chappellaz J. et al. (1990): Ice core record of atmospheric methane over the past 160 000 years, Nature *345*, 127–31.

Fourier, J.-B. J. (1824): Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France VII, 569–604.

Gassmann, F., Weber, R. (1989): Vom Menschen verursachte Klimaveränderungen, verfasst im Auftrag der Schweiz. Phys. Ges., c/o Physik-Institut der Univ. Zürich.

IPCC (1990): Scientific Assessment of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Report of Working Group I, WMO/UNEP, Geneva, 1990.

Lorius, C. et al. (1990): The ice core record: climate sensitivity and future greenhouse warming, Nature, Vol. *347*, 139–145.

', J.F.B. (1989): The «Greenhouse» effect and climate change, Rev. Geophysics, *27*, 1. 39.

Geographic (Dec. 1988): Endangered Earth, Vol. 174, No. 6, Posterbeilage; Zukunfts- o nach United Nations' Assessment.

n, Labor für Umwelt- und Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136/2*: 105–111

Die Fruchtfliegen der Stadt Zürich *(Diptera: Tephritidae)*

Bernhard Merz, ETH Zürich

Auf dem Gebiet der Stadt Zürich wurden 1987–1990 insgesamt 31 Arten von Fruchtfliegen *(Diptera: Tephritidae)* aus 20 Gattungen gefunden. Für *Tephritis matricariae* (LOEW) wird mit *Crepis taraxacifolia* eine neue Wirtspflanze nachgewiesen. Phänologie, Wirtspflanzenbeziehungen und Biotopbindung der einzelnen Arten werden diskutiert.

The Fruit-Flies of the Town of Zürich *(Diptera: Tephritidae)*

31 fruit-fly species *(Diptera: Tephritidae)* were found in the town of Zürich between 1987 and 1990. *Crepis taraxacifolia* is a new host plant for *Tephritis matricariae* (LOEW). The phenology, host plant relationships and the association of the flies to different habitats are discussed.

1 Einleitung

Die Frucht- oder Bohrfliegen *(Diptera: Tephritidae)* sind eine grössere Familie mit weltweit etwa 4500 beschriebenen Arten (R. H. Foote, 1984). Die überwiegende Mehrheit der Arten ist streng phytophag, wobei sämtliche Organe der Pflanzen befallen werden können. Einige Arten sind von grosser wirtschaftlicher Bedeutung, wie etwa die Olivenfliege, *Dacus oleae* (GMELIN), die Kirschenfliege, *Rhagoletis cerasi* (LINNE), oder die Mittelmeerfruchtfliege, *Ceratitis capitata* (WIEDEMANN). In neuerer Zeit sind ein paar Arten als Nützlinge erkannt worden. Nach Nordamerika sind einige europäische Distelarten eingeschleppt worden, die sich auf Weideflächen stark ausgebreitet haben. Mit dem Einsatz von Fruchtfliegen zur biologischen Bekämpfung dieser Pflanzen sind schon gewisse Erfolge erzielt worden (P. Harris, 1984).

Erstaunlicherweise sind die Fruchtfliegen in der Schweiz trotz ihrer grossen Bedeutung noch nie gesamthaft faunistisch untersucht worden. Die einzigen beiden Lokallisten betreffen die Zentralschweiz (B. Merz, 1989, 1990). Einige Angaben findet man auch bei C. Meier & W. Sauter (1989). Mit der vorliegenden Arbeit wird zum ersten Mal eine Artenliste über ein Gebiet des Mittellandes vorgelegt. Nach W. Sauter (1968) gehört die Stadt Zürich faunistisch zum zentralen Mittelland von Reuss-Lorze bis zum Bodensee (faunistische Region M2c).[1]

[1] Ich möchte Herrn Prof. Dr. W. Sauter, Zürich, für die Durchsicht des Manuskriptes und Herrn Dr. G. Bächli, Zürich, für die Ausleihe einiger Tiere herzlich danken. Einen grossen Dank schulde ich auch dem Kantonalen Amt für Raumplanung, Fachstelle Naturschutz, für die Sammelerlaubnis in den Naturschutzgebieten sowie Frau M. Eggenberger, Frau E. Mühlemann und Herrn X. Li für ihre Hilfe bei der Feldarbeit und für diverse Anregungen bei der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit.

2 Material und Methoden

Die meisten der 605 untersuchten Fliegen wurden von mir zwischen 1987 und 1990 anlässlich von 20 Exkursionen auf dem Gebiet der Stadt Zürich gesammelt. Es wurde darauf geachtet, möglichst alle Gegenden der Stadt zumindest einmal aufzusuchen. Wegen ihrer Reichhaltigkeit wurden den Gebieten um den Schiessplatz Albisgütli und dem Zürichberg in der Nähe des Zoos besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Fliegen wurden grösstenteils mit dem Netz erbeutet. Daneben wurden noch einige Pflanzenproben mitgenommen, aus denen im Verlaufe der nächsten Tage bis Monate weitere Fliegen schlüpften. Einige weitere Tiere konnte ich in den Sammlungen der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, und in der Sammlung von G. Bächli, Zoologisches Museum der Universität Zürich, einsehen.

Zur Bestimmung der Tiere gelangten die Werke von F. Hendel (1927), E. Séguy (1934) und I. M. White (1988) zur Anwendung. Im letztgenannten Werk sind ausführliche Angaben zur Verbreitung und Biologie der Arten angegeben, so dass in der folgenden Artenliste nicht weiter darauf eingegangen wird. Die Nomenklatur richtet sich nach R. H. Foote (1984), mit Ausnahme der *Terelliinae* (V. A. Korneyev, 1985). Die systematische Gliederung folgt A. Freidberg & J. Kugler (1989). Die Pflanzennamen werden nach H. E. Hess, E. Landolt & R. Hirzel (1980) zitiert.

Die Fliegen werden in folgenden Sammlungen aufbewahrt: Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich (ETHZ), Sammlung G. Bächli, Zoologisches Museum der Universität Zürich (CGB) und Sammlung B. Merz (CBM).

3 Artenliste

Bei jeder Art werden folgende von mir im Feld ermittelte Angaben gemacht: Zahl der untersuchten Tiere, Sammelmonate (in römischen Ziffern), Fundorte, Biotope, die Wirtspflanzen, aus welchen die Art in der Stadt Zürich gezogen wurde und der Aufbewahrungsort der Fliegen.

Unterfamilie: *Myopitinae*

1. *Urophora cardui* (Linne, 1758): 65 ♂♂, 49 ♀♀, V–VI, Zürichberg-Waldhüsli, Albisgütli, Uto. Auf Waldschlägen. Aus Stengelgallen von *Cirsium arvense* gezogen (ETHZ, CGB, CBM). Diese Art ist in der Schweiz offenbar sehr selten. Sie hat nach bisherigen Erkenntnissen ihre grösste Population in der Schweiz auf dem Zürichberg.
2. *Urophora jaceana* (Hering, 1935): 2 ♂♂, 2 ♀♀, Albisgütli. Auf Halbtrockenrasen. Aus Blütenkopfgallen von *Centaurea jacea* gezogen (Pflanzenprobe im Oktober gesammelt, Adulte im Fruhling geschlüpft) (CBM).
3. *Urophora stylata* (Fabricius, 1775): 51 ♂♂, 44 ♀♀, VI–VII, Zoo, Zürichberg-Waldhüsli, Uetliberg, Leimbach, Hönggerberg, Irchel. Auf Waldschlägen und Ruderalstandorten. Aus Blutenkopfgallen von *Cirsium vulgare* gezogen (CBM).

...terfamilie: *Tephritinae*

...*thiophilus helianthi* (Rossi, 1790): 1 ♂, VIII, Albisgütli. Auf einer Fettwiese (CBM).

5. *Dioxyna bidentis* (Robineau-Desvoidy, 1830): 2 ♂♂, VIII, Katzensee. Auf einer Ruderalstelle (CBM).
6. *Ensina sonchi* (Linne, 1767): 1 ♂, 2 ♀♀, VIII. Albisgütli. Auf einer Fettwiese (CBM).
7. *Noeeta pupillata* (Fallen, 1814): 1 Puppe, Paradeplatz. In einer Mauerspalte. Im Blütenkopf von *Hieracium murorum* gefunden (CBM).
8. *Oxyna flavipennis* (Loew, 1844): 1 ♂, 1 ♀, VIII, Albisgütli, Katzensee. Auf Ruderalstandorten. Auf *Achillea millefolium* gesammelt (CBM).
9. *Sphenella marginata* (Fallen, 1814): 1 ♂, 2 ♀♀, VIII, Albisgütli. Auf einer Ruderalstelle. Auf *Senecio erucifolius* gesammelt (CBM).
10. *Tephritis cometa* (Loew, 1840): 4 ♂♂, 1 ♀, VI–VIII, Albisgütli, Höckler, Zürichberg. Auf Ruderalstellen. Aus Blütenköpfen von *Cirsium palustre* gezogen (CBM).
11. *Tephritis conura* (Loew, 1844): 41 ♂♂, 37 ♀♀, VII–VIII, Waldgarten, Albisgütli, Zoo, Zürichberg. Auf Waldschlägen und an Wegrändern im Wald. Aus den Blütenköpfen von *Cirsium oleraceum* gezogen, wo stets mehrere Larven in einem Blütenkopf leben (CGB, CBM).
12. *Tephritis dioscurea* (Loew, 1856): 2 ♂♂, 3 ♀♀, VIII, Hönggerberg. Auf einer Fettwiese. Aus Blütenköpfen von *Achillea millefolium* gezogen (CBM).
13. *Tephritis formosa* (Loew, 1844): 2 ♂♂, 2 ♀♀, VIII. Central, Oerlikon. In Gartenrabatten. Aus Blütenköpfen von *Sonchus oleraceus* gezogen. (CBM).
14. *Tephritis leontodontis* (Degeer, 1776): 1 ♂, VIII, Central. In Gartenrabatten (CBM).
15. *Tephritis matricariae* (Loew, 1844): 95 ♂♂, 87 ♀♀, V, Hönggerberg. Auf einer Magerwiese. Aus Blütenköpfen von *Crepis taraxacifolia* gezogen (ETHZ, CBM). Nach einer zweifelhaften Angabe in E. Séguy (1934) ist die Art bisher erst aus *Crepis capillaris* bekannt. *C. taraxacifolia* ist eine für die Art neue Futterpflanze.
16. *Tephritis neesii* (Meigen, 1830): 1 ♂, IV, Schwamendingen. Auf einer Magerwiese (CBM).
17. *Tephritis separata* Rondani, 1871: 2 ♂♂, VIII, Albisgütli. Auf einer Ruderalstelle. Auf *Picris hieracioides* gesammelt (CBM).
18. *Trupanea stellata* (Fuessly, 1775): 1 ♂, 1 ♀, VI–VIII, Albisgütli. Auf einer wechselfeuchten Magerwiese und einer Ruderalstelle (CBM).
19. *Xyphosia miliaria* (Schrank, 1781): 15 ♂♂, 10 ♀♀, VI–VIII, Katzensee, Waldgarten, Hönggerberg, Höckler, Albisgütli, Oerlikon, Zürichberg, Uto. Auf Waldschlägen, Ruderalstellen und an Wegrändern im Wald. Aus Blütenköpfen von *Cirsium arvense* gezogen (ETHZ, CGB, CBM). Diese Art ist eine der häufigsten Arten in der Stadt.

Unterfamilie: *Terelliinae*

20. *Chaetostomella cylindrica* (Robineau-Desvoidy, 1830), 18 ♂♂, 5 ♀, V–VIII, Albisgütli, Waldgarten, Höckler. Auf wechselfeuchten Magerwiesen und auf Ruderalstellen. Aus den Blütenköpfen von *Cirsium palustre* und *Centaurea jacea* gezogen (ETHZ, CBM).
21. *Orellia falcata* (Scopoli, 1763): 6 ♂♂, 3 ♀♀, Zürich. Ohne weitere Angaben in ETHZ.
22. *Terellia ruficauda* (Fabricius, 1794): 1 ♂, 1 ♀, VI–VII, Höckler, Zoo. Auf einer Ruderalstelle und einem Waldschlag. Auf *Cirsium arvense* gesammelt (CBM).

Unterfamilie: *Trypetinae*

23. *Acidia cognata* (Wiedemann, 1817): 8 ♂♂, 4 ♀♀, VII–VIII, Zürichberg, Waldgarten, Albisgütli. Auf Waldschlägen. Aus Blattminen von *Tussilago farfara* gezogen (ETHZ, CGB, CBM).
24. *Anomoia purmunda* (Harris, 1776): 3 ♂♂, 2 ♀♀, VI–VIII, Central, Oerlikon. In Gartenrabatten. Auf *Cotoneaster sp.* gesammelt (CBM).
25. *Cryptaciura rotundiventris* (Fallen, 1814): 1 ♂, VIII, Albisgütli. Im Wald. Auf *Aegopodium podagraria* gesammelt (CBM).
26. *Euleia heraclei* (Linne, 1758): 1 ♂, 3 ♀♀, VI, Zürich. Ohne weitere Angaben (ETHZ, CGB).
27. *Myoleja caesio* (Harris, 1776): 2 ♀♀, VIII, Albisgütli. Im Wald (CGB, CBM).
28. *Rhagoletis alternata* (Fallen, 1814): 1 ♀, Zürich. Ohne weitere Angaben (CGB).
29. *Rhagoletis cerasi* (Linne, 1758): 7 ♂♂, 5 ♀♀, VI, Entlisberg. Entlang einer angepflanzten Hecke. Auf *Lonicera sp.* (CBM).
30. *Rhagoletis meigenii* (Loew, 1844): 2 ♀♀, VI, Central. In einer Gartenrabatte (CGB, CBM).
31. *Trypeta zoe* Meigen, 1826: 2 ♀♀, VI, Zürich. Ohne weitere Angaben (ETHZ, CGB).

4 Angaben zur Phänologie, Biotopbindung und den Wirtspflanzen

4.1 Phänologie

In untenstehender Übersicht wird die Zahl der jeden Monat gefundenen Arten angegeben, die als Adulte gefangen wurden. Tiere, die aus Pflanzenproben geschlüpft sind, werden nicht aufgeführt, da die Bedingungen im Labor nicht mit den Freilandverhältnissen übereinstimmen. In den Monaten September bis März wurde nur sehr sporadisch gesammelt. Möglicherweise könnten in diesen Monaten noch einige Arten gefunden werden.

Januar:	0	Mai:	3	September:	0
Februar:	0	Juni:	12	Oktober:	0
März:	0	Juli:	9	November:	0
April:	1	August:	18	Dezember:	0

Es zeigt sich deutlich, dass die meisten Arten im Sommer (Juni–August) gefunden wurden. Dieses Resultat überrascht nicht, da diese Periode in die Hauptblütezeit der meisten Wirtspflanzen fällt. Nur zwei Arten, *Tephritis neesii* und *Tephritis matricariae*, wurden ausschliesslich im Frühling gefangen. Gerade in der Gattung *Tephritis* können noch mehr Arten im Frühling erwartet werden, da die Vertreter dieser Gattung als Imagines überwintern und manchmal an sonnigen und warmen Tagen auch früher im Jahr fliegen.

4.2 Biotopbindung

Zur Charakterisierung der Biotopzugehörigkeit der Fruchtfliegen wurde jeder Fang einem von 6 Biotoptypen zugeordnet. In der untenstehenden Zusammenstellung wird die Anzahl Arten pro Biotop angegeben.

Ruderalstellen:	10	Waldstandorte:	2
Magerwiesen:	5	Waldschlag & Waldwege:	6
Fettwiesen:	3	Kunstbiotope (Rabatten):	6

Am meisten Arten wurden auf Ruderalstellen gefunden, während Fettwiesen und Wälder artenarm sind. Dieses Resultat lässt sich damit erklären, dass Ruderalstellen eine sehr grosse Zahl geeigneter Wirtspflanzen, wie *Cirsium*, *Centaurea* oder *Picris*, besitzen. Auf den ersten Blick überraschend hingegen ist die grosse Artenzahl auf Kunstbiotopen, d.h. auf Gartenrabatten und angepflanzten Hecken. Auch hier sind jedoch zahlreiche potentielle Wirtspflanzen zu finden, die angepflanzt wurden (*Cotoneaster sp.*, *Lonicera sp.*) oder die als Unkräuter zwischen den Gartenpflanzen wachsen (*Sonchus oleraceus*, *Leontodon autumnalis*). Gerade *Anomoia purmunda*, die auf *Cotoneaster sp.* lebt, war noch vor einigen Jahrzehnten in Europa sehr selten und hat sich erst in den letzten Jahren stark ausgebreitet (L. Greve, 1986).

4.3 Wirtspflanzenbeziehungen

Die folgende Liste gibt an, aus welchen Pflanzenarten die verschiedenen Fruchtfliegen in der Stadt Zürich gezogen wurden. Manchmal wurden die Fliegen auf Pflanzen gefunden, die höchstwahrscheinlich als Wirtspflanzen anzusehen sind, da sie von Reinbeständen der Pflanzen gesammelt wurden. Solche Pflanzen sind in Klammern angegeben.

Acidia cognata:	*Tussilago farfara*
Anomoia purmunda:	*(Cotoneaster sp.)*
Chaetostomella cylindrica:	*Centaurea jacea*
	Cirsium arvense
Cryptaciura rotundiventris:	*(Aegopodium podagraria)*
Noeeta pupillata:	*Hieracium murorum*
Oxyna flavipennis:	*(Achillea millefolium)*
Rhagoletis cerasi:	*(Lonicera sp.)*
Sphenella marginata:	*(Senecio erucifolius)*
Tephritis cometa:	*Cirsium palustre*
Tephritis conura:	*Cirsium oleraceum*
Tephritis dioscurea:	*Achillea millefolium*
Tephritis formosa:	*Sonchus oleraceus*
Tephritis matricariae:	*Crepis taraxacifolia*
Tephritis separata:	*(Picris hieracioides)*
Terellia ruficauda:	*(Cirsium arvense)*
Urophora cardui:	*Cirsium arvense*
Urophora jaceana:	*Centaurea jacea*
Urophora stylata:	*Cirsium vulgare*
Xyphosia miliaria:	*Cirsium arvense*

Total wurden 13 Insekten-Pflanzen-Beziehungen durch Zuchten festgestellt. In 6 weiteren Fällen wurden die Fruchtfliegen auf Reinbeständen von Pflanzen gefunden, die wahrscheinlich als Wirtspflanzen anzusehen sind und auch in der Literatur als solche schon gemeldet wurden.

5 Diskussion

Insgesamt wurden 31 Arten von Fruchtfliegen aus 20 Gattungen in der Stadt Zürich gefunden.

Obwohl fast jeder Winkel der Stadt Zürich durch menschliche Aktivität nachhaltig beeinflusst wird und der Bevölkerungsdruck auf die noch freien Flächen sehr gross ist, konnten in Zürich mehr Arten gefunden werden als in den beiden Gebieten der Zentralschweiz, von denen Artenlisten vorliegen (B. Merz, 1989, 1990). Nebst der intensiveren Sammeltätigkeit dürften die grössere Zahl verschiedenartiger Biotope und damit der potentiellen Wirtspflanzen für dieses erstaunliche Resultat verantwortlich sein. So fehlen in den beiden Gebieten der Zentralschweiz die für Fruchtfliegen sehr wichtigen Ruderalstellen und grösstenteils reich strukturierten Waldränder, wie sie beim Schiessplatz Albisgütli

oder auf dem Zürichberg noch zahlreich vorhanden sind.

Vom systematischen Standpunkt aus gehören die meisten Arten erwartungsgemäss in die Unterfamilie der *Tephritinae* (16 Arten), der in Europa die meisten Arten angehören. Interessanterweise ist auch die Zahl der *Trypetinae* mit 9 Arten sehr hoch. Diese Arten, deren Larven meist in fleischigen Früchten oder als Blattminierer leben, werden meistens nur selten gesammelt, da sie oft weitab von ihren Wirtspflanzen an Waldrändern und auf Bäumen vorkommen (I. M. White, 1988). Die meisten Arten dieser Unterfamilie wurden auf Kunstbiotopen (Rabatten) oder in Wäldern gefunden. Diese Biotope werden normalerweise bei Untersuchungen mit Fruchtfliegen selten abgesucht.

Wenn man die Futterpflanzen der gefundenen Arten betrachtet, so leben die meisten Arten an Compositen, während nur wenige Arten, z. B. die Früchtefresser, an andere Pflanzen gebunden sind. Diese Beobachtung ist für die Westpalaearktis typisch und wurde schon in anderen Ländern festgestellt (J. Dirlbek & O. Dirlbekova, 1985, A. Freidberg & J. Kugler, 1989, F. Mihalyi, 1960, I. M. White, 1988).

Trotz der hohen Artenzahl und der intensiven Sammeltätigkeit sind noch weitere Arten in der Stadt Zürich zu erwarten. Unter Berücksichtigung der potentiellen Wirtspflanzen sowie den Funden aus Nachbargebieten (Reusstal, Region von Bülach) können noch weitere 5–7 Arten in Zürich erwartet werden. Damit dürften heute gut 80% der zürcherischen Arten bekannt sein.

6 Literatur

Dirlbek, J. & Dirlbekova, O. (1985): Results of investigating the host plants of fruit flies (Diptera: Tephritidae) in the CSSR. Ann. Res. Inst. Crop Production Prague-Ruzyne *23:* 151–164.

Foote, R. H. (1984), Tephritidae (Trypetidae). In Soos, A. & Papp, L. (Eds), Catalogue of Palaearctic Diptera *9:* 66–149, Budapest.

Freidberg, A. & Kugler, J. (1989), Fauna Palaestina. Insects IV. Diptera: Tephritidae. The Israel Academy of Sciences and Humanities. Jerusalem. 212 pp.

Greve, L. (1986), Three species of Tephritidae (Dipt.) new to Norway, with a note on Phagocarpus permundus (Harris, 1780) in Norway. Fauna norv. Ser. B *33 (1):* 40–43.

Harris, P. (1984), Current approaches to biological control of weeds. In: Kelleher, J. S. & Hulme, M. A. (Eds), Biological control programms against insects and weeds in Canada 1969: *180*, 95–104.

Hendel, F. (1927), 49. Trypetidae. In: Lindner, E. (Ed.), Die Fliegen der Palaearktischen Region *5 (1)*, 221 pp. Stuttgart.

Hess, H. E., Landolt, E. & Hirzel, R. (1980), Flora der Schweiz und angrenzender Gebiete. Band 3, 2. Auflage. 876 pp. Basel.

Korneyev, V. A. (1985), Fruit flies of the tribe Terelliini Hendel, 1927 (Diptera: Tephritidae) of the fauna of the USSR. Ent. Obozr. *64:* 626–644 (Auf russisch).

Meier, C. & Sauter, W. (1989), Zur Kenntnis der Insektenfauna eines Auenwaldreservates an der Aare bei Villnachern AG. Mitt. Aarg. Naturf. Ges. *32:* 217–258.

Merz, B. (1989), Zur Insektenfauna von Gersau-Oberholz, Kanton Schwyz. VIII. Diptera 1: Tephritidae (Fruchtfliegen). Ent. Ber. Luzern *22:* 103–106.

Merz, B. (1990), Zur Insektenfauna von Rigi-Kulm, 1600–1797 m, Kanton Schwyz. IX. Diptera 1: Tephritidae (Fruchtfliegen). Ent. Ber. Luzern *23:* 31–36.

Mihalyi, F. (1960). 51. Csalad: Trypetidae-Furolegyek. Fauna Hungaricae *15 (3)*. 76 pp. (Auf ungarisch)

Sauter, W. (1968). Zur Zoogeographie der Schweiz am Beispiel der Lepidopteren. Mitt. Schweiz. Ent. Ges. *41:* 330–336.

Séguy, E. (1934). Diptères (Brachycères) (Muscidae Acalyptrae et Scatophagidae). Faune de France *28*. 832 pp. Paris.

White, I. M. (1988). Tephritid flies – Diptera: Tephritidae. Handbk Ident. Br. Insects *10 (5 a)*. 134 pp.

Bernhard Merz, Entomologisches Institut ETH, Clausiusstr. 21, CH-8092 Zürich

Buchbesprechung

Heinrich Jäckli: Geologie von Zürich. Von der Entstehung der Landschaft bis zum Eingriff des Menschen. Mit 133, z.T. ganzseitigen Abb., 215 S. 1989. Orell Füssli (Zürich). Fr. 88.–.

Dieses Buch ist eine aussergewöhnliche Gesamtschau: seine Lektüre begeistert von der ersten Fragestellung in der Einleitung bis zum erdgeschichtlichen Ausblick am Schluss. Der Leser ist gefesselt von jener Ausstrahlung, die vom logischen Aufbau und der klaren, bebilderten Darstellung ausgeht.

Mit der Frage «Wozu ein Buch über ‹eine gar nicht heroische Geologie›?» lädt der Autor zu einem Gang durch die Erdgeschichte von Zürich ein. Der Leser spürt aus der Aufeinanderfolge der gewählten Kapiteleinteilung und aus der logischen Darstellung in den einzelnen Abschnitten, dass ein solches Werk nur aus einer handfesten Beschäftigung mit der Materie herauswachsen kann. Die jahrzehntelange Auseinandersetzung mit den geologischen Bedürfnissen des Menschen, die Beantwortung konkreter Fragestellungen der Praxis ist offenbar für ein klares Erfassen der wesentlichen Elemente unserer erdgeschichtlichen Umgebung zumindest eine günstige, wenn nicht sogar eine notwendige Voraussetzung. Es sind aber noch weitere Grundlagen, welche das Buch von Heinrich Jäckli in einen übergeordneten Zusammenhang stellen, die sowohl für den Bürger Zürichs, den bauenden Ingenieur als auch für den Fachkollegen wichtig sind: jedes Kapitel des Buches ist in direkter Beziehung zur geologischen Tätigkeit des Menschen gesehen. Der Leser ist somit als Mitbetroffener im weitesten Sinne einbezogen. Dieses direkte Angesprochensein zum Mitgehen und Teilhaben ist, so intensiv, weil die heimatliche Beziehung des Autors zur dargestellten Geologie den Rahmen des Fachwissens bildet.

Wenn Heinrich Jäckli feststellt, dass die Geologie von Zürich einfach aufgebaut ist, dann heisst das eben nicht, dass diese Landschaft bedeutungslos sei. Im Gegenteil! Sie ist unser Lebens- und Erholungsraum, und sie ist Lebensgrundlage, aus der wir Baustoffe und inkwasser beziehen und aus der Bodenbil-igen für Pflanzungen verwittern. – Jedes der uptkapitel (I) bis (XI) ist Analyse und Synthese zugleich, und jedes ist im vorliegenden Werk notwendiger Bestandteil, um «Rückblick und Ausblick» zu ermöglichen.

Nur wem durch seine Tätigkeit als praktischem Geologe das erdgeschichtliche Verständnis Anliegen bleibt, der kann sich über das Kapitel «Unbeherrschte Eingriffe des Menschen» hinaus einen «Ausblick» auf die weitere geologische Entwicklung im hier dargestellten Sinne leisten. Mit konsequenter gedanklicher Entwicklung diskutiert der Autor, wie sich die weitere Tätigkeit des Menschen auf die natürliche geologische Entwicklung auswirken könnte: Werden wir «nur» anthropogene Leitfossilien produzieren, oder wird unser Einfluss so bedeutend sein, dass die Prinzipien des geologischen Aktualismus zu revidieren sind? Der Autor führt uns die Landschaft Zürichs in 10000, 1000000 und in 10000000 Jahren vor und fordert so zum Nach- und Vorausdenken auf. Die geologische Vergangenheit Zürichs hat auch Zukunft – eine noch unübliche, aber konsequente Folgerung aus einer geologischen Gesamtschau.

Die «Geologie von Zürich» ist ein Buch für eine breite, an der Geschichte unserer Umgebung interessierte Leserschaft; der Text und die zum Teil ganzseitigen Abbildungen ergänzen einander harmonisch, und «Register» und «Verzeichnis der geologischen Fachausdrücke» erleichtern den Zugang zu den dargestellten Fachkenntnissen. Die Sprache des Buches fesselt den Leser; sie öffnet ihm in ihrer Klarheit die Augen für das Schöne und das Interessante an einer einfachen und unspektakulären Geologie. Die «Geologie von Zürich» ist ein Buch, das neben Wissen auch die Freude an diesem Wissen verbreitet.

Christian Schlüchter

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/2: 113–130

Was war zuerst, das Virus oder der Wirt?[1]

Martin Schwyzer, Universität Zürich

Weder die Viren noch die dadurch hervorgerufenen Krankheiten haben fossile Spuren hinterlassen. Kein Virusisolat existiert, das mehr als 80 Jahre alt wäre. Dennoch vermitteln uns die Epidemiologie und die molekulare Analyse der heutigen, Tiere und Menschen infizierenden Viren ein zunehmend klares Bild von deren entfernten Vorläufern. Die Viren und Viroide geben auch Anlass zu Spekulationen, dass sie am Ursprung des Lebens beteiligt sein könnten, da sie zu den einfachsten Informationsträgern mit der Fähigkeit der Selbstvermehrung gehören. Diese Frage lässt sich aber kaum schlüssig beantworten; denn die Evolution der Viren verläuft rund eine Million mal schneller als die der Wirtsorganismen.

Which came first, the virus or the host?

Neither the viruses nor their pathogenesis have left a fossil record. No existing virus isolates are more than 80 years old. Yet, epidemiology and molecular analysis of contemporary viruses infecting animals and man contribute to an increasingly clear view of their distant predecessors. Viruses and viroids also inspire speculation about their possible involvement in the origin of life, because they are among the simplest entities carrying instructions for their own multiplication. However, since the rate of virus evolution is roughly a million times higher than that of the host, this question may never lead to a conclusive answer.

1 Einleitung

Seit Anfang 1991 ist die Schutzimpfung der Rinder gegen Maul- und Klauenseuche (MKS) in der Schweiz verboten. Zuvor war sie nicht nur erlaubt, sondern sogar obligatorisch. Was steckt hinter diesem kapriziös anmutenden Entscheid? Die MKS-Schutzimpfung geht auf den verheerenden Seuchenzug von 1965/66 zurück. Die Krankheit schlug damals überraschend zu, doch traf sie die Schweiz nicht unvorbereitet. Der Erreger war bekannt. Es handelt sich um ein kugelförmiges, sehr kleines Virus, das zur Familie der Picornaviren gehört (J.B. Brooksby, 1988). Etwa 40 000 Viren aneinandergereiht würden erst einen Millimeter ergeben. Aus solchen Viren wurde durch chemische Inaktivierung ein Impfstoff hergestellt. In geimpften Tieren bildeten sich Antikörper, welche noch nicht befallene Tiere vor der Infektion schützten. Seither wurde eine alljährliche Impfkampagne für sämtliche Rinder für obligatorisch erklärt. Das Vorgehen hat sich während 25 Jahren bewährt. Eine ganze Generation von Tierärzten hat die typischen Aphthen und Erosionen der Maul- und Klauenseuche nicht mehr zu sehen bekommen.

Entsprechende Erfolge waren in ganz Europa zu verzeichnen. Die Krankheit wurde so selten, dass einzelne Länder, wie Dänemark und Österreich, beschlossen, sie könnten auf die Impfung verzichten und sich die Kosten sparen. Ab 1992 wird die gesamte Europäische Gemeinschaft diesem Beispiel folgen und die

[1] Nach der Antrittsvorlesung an der Universität Zürich vom 19. Januar 1991

MKS-Impfung verbieten (H. Pittler und H.J. Bätza, 1990). Auf Grund der gegenwärtigen Seuchenlage ist ein Ausbruch selbst bei ungeimpften Tieren wenig wahrscheinlich. Sollte es doch dazu kommen, würde der betroffene Hof gesperrt und raschmöglichst saniert. Weil die Schweiz nicht EG-Mitglied ist, verbietet sie die Impfung bereits ein Jahr früher. Innerhalb der EG sind die Grenzen frei, aber Schweizer Tiere werden an der Grenze kontrolliert. In Zukunft werden Antikörper gegen MKS ein virusinfiziertes Tier anzeigen, da ja nicht mehr geimpft wird. Folglich verlangt die EG, dass die letzte Schutzimpfung mindestens ein Jahr zurückliegt.

Das Thema ist hier nicht der Fleischexport in die EG-Länder, sondern der Ursprung der Viren. Das Beispiel des MKS-Virus soll die folgenden drei Punkte illustrieren.

1.1 Keine Virusvermehrung ohne empfänglichen Wirt

Ein korrekt gegen MKS geimpftes Tier ist für einige Zeit kein empfänglicher Wirt und trägt nicht mehr zur Vermehrung von MKS bei. Auch ein totes Tier ist für Viren nicht mehr empfänglich, wohl aber für gewisse Bakterien. Das liegt in der Natur der Viren. Die Proteinhülle des MKS-Virus hat die Gestalt einer Hohlkugel und birgt im Innern das infektiöse Material, ein fadenförmiges Molekül aus Ribonukleinsäure, kurz RNA genannt. Die RNA stellt die virale Erbsubstanz dar und enthält die Information für die Produktion neuer Virushüllen und neuer Virus-RNA (Bild 1). Für eine allgemeinverständliche Einführung in die beteiligten Mechanismen sei auf die Literatur verwiesen (A. Scott, 1990). Kurz gesagt: die Virus-RNA befiehlt, aber arbeitet nicht. Die ganze Arbeit besorgt die Wirtszelle. Deshalb gilt für alle Viren, dass sie nur in lebenden Zellen vermehrungsfähig sind.

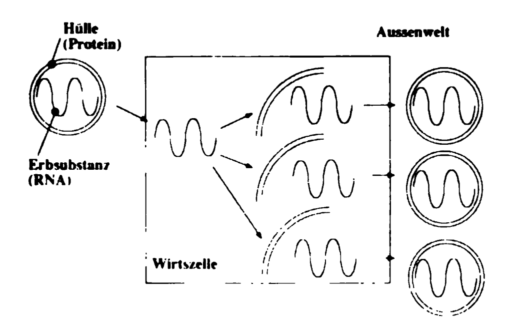


Bild 1 Prinzip der Virusvermehrung in der Wirtszelle.

Fig. 1 Principle of virus replication in the host cell.

sind ausserhalb des Wirtes nur während beschränkter Zeit infektiös

szeit ist immer beschränkt, auch wenn sie in weiten Grenzen Zum Beispiel verlieren sexuell übertragene Viren ihre Infektio-

sität in der Aussenwelt meist rasch, weil sie über einen sehr kurzen Weg von Wirt zu Wirt verfügen. Das MKS-Virus kann über grössere Distanzen übertragen werden und gilt als ausgesprochen stabil; trotzdem wird es im Laufe der Monate seine Aktivität verlieren.

1.3 Nur in einer ununterbrochenen Infektkette kann eine Virusart fortbestehen

Praktisch bedeutet dies, dass die Infektkette durch Schutzimpfung oder durch Keulung infizierter Tiere gebrochen werden kann. In Europa ist dies weitgehend gelungen, und die Eradikation der MKS steht hier bevor. Australien und der nordamerikanische Kontinent sind schon seit Jahrzehnten frei von MKS; dagegen sind grosse Teile Südamerikas, Afrikas und Asiens weiterhin mit verschiedenen MKS-Typen verseucht.

Die theoretische Bedeutung der ununterbrochenen Infektkette ist, dass sie seit der Entstehung des MKS-Virus bestanden haben muss. Die Wiederkäuer und die Schweine haben sich vor etwa 60 Millionen Jahren auseinanderentwikkelt. Als Paarhufer sind sie beide empfänglich für MKS. Hat das Virus sie seit 60 Millionen Jahren begleitet und sich mit ihnen entwickelt? Hat die Infektkette nur in einer Spezies bestanden? Oder ist das Virus erst später von anderswoher gekommen? Die Wurzel des Problems liegt tiefer. Wir machen einen weiten Sprung zurück und fragen, wann und wie das Leben überhaupt entstand.

2 Das Rätsel der Entstehung des Lebens

Bei diesem Ereignis war naturgemäss niemand zugegen. So sind der beschreibenden Phantasie keine Grenzen gesetzt. Immerhin existieren plausible Modelle, die sich aus verschiedenen Disziplinen nähren, von der Kosmologie über Geologie, Paläontologie, vergleichende Anatomie, molekulare Genetik bis zur Philosophie im weitesten Sinn.

Wie alt ist unser Sonnensystem und damit auch die Erde? Bis ins 17. Jahrhundert galt die Meinung der Kirche, beispielsweise das Dekret eines irischen Erzbischofs, der den Beginn der Schöpfung auf Montag, den 26. Oktober 4004 v. Chr., um 9 Uhr morgens ansetzte (F. Press and R. Siever, 1978). Bereits viel höher lagen die Schätzungen gegen Ende des 19. Jahrhunderts, nämlich um die 100 Millionen Jahre. Aber erst die Entdeckung der Radioaktivität ermöglichte die heute akzeptierte Datierung von ungefähr 4½ Milliarden Jahren. Man vermutet, dass die Erde im Anfang sehr unwirtlich war. Die Atmosphäre war dünn und enthielt keinen Sauerstoff, sondern u.a. Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff. Die Erdkruste wurde von katastrophalen Ereignissen heimgesucht, von aussen durch Meteoriten, die damals ungleich grösser und häufiger waren als heute, und von innen durch radioaktiven Zerfall, Erwärmung des Erdkerns und Vulkanismus. Die vorhandenen Rohstoffe und die verfügbare Energie schienen aber für die

spontane Bildung von Makromolekülen gerade richtig. Jedenfalls konnte in Simulationsversuchen die Bildung von Aminosäuren, Basen und Zuckern nachgewiesen werden, also von möglichen Bausteinen des Lebens (S.L. Miller and L.E. Orgel, 1974). In einer so entstandenen präbiotischen Suppe müssen sich irgendwann innert der ersten Jahrmilliarde die ersten Lebewesen entwickelt haben, denn die ältesten bekannten Fossilien werden auf etwa 3,5 Milliarden Jahre datiert. Sie bilden sogenannte Stromatoliten (R.F. Dill et al., 1986), eine Art Algenmatte, wie sie heute noch in Salzlagunen gefunden werden.

Ich möchte das Rätsel der Entstehung des Lebens mit einer Lithographie von Maurits Escher (B. Ernst, 1982) illustrieren (Bild 2). Was geht hier vor? Die obere Hand hat soeben die untere Hand fertiggezeichnet und ist jetzt daran, die Manschette des Ärmels aufs Papier zu bannen. Gleichzeitig hat die untere Hand genau dasselbe mit der oberen Hand vollbracht. Objektiv gesehen sind es zwei Kopierinstrumente, die imstande sind, einander selbst zu kopieren. Das entspricht der einen Bedingung für die Entstehung des Lebens. Die andere Bedin-

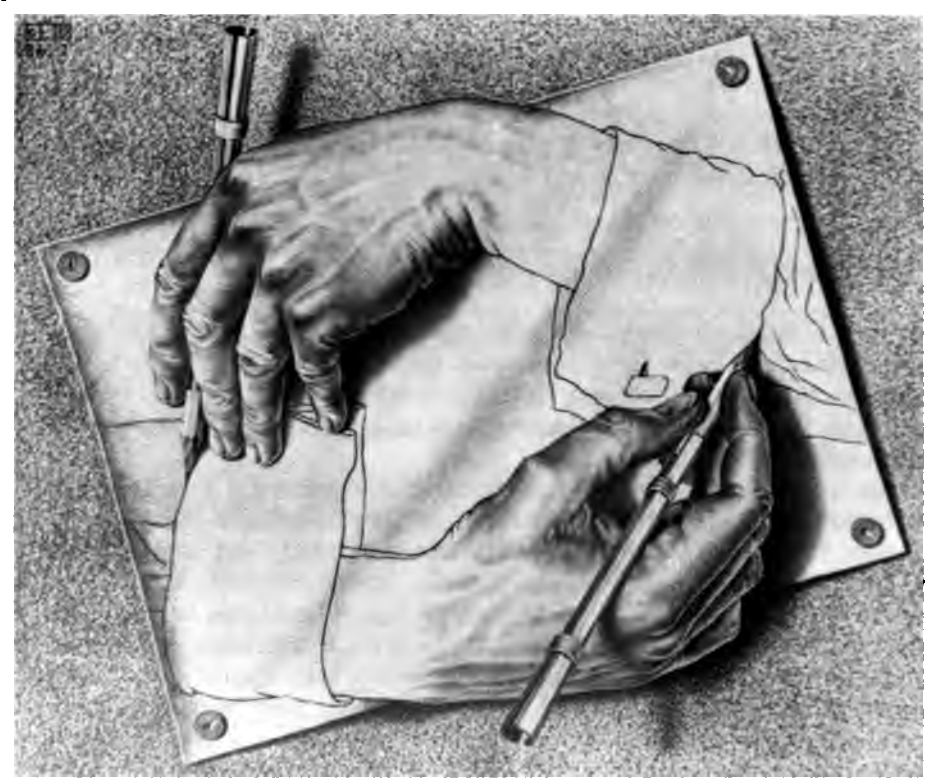


Bild 2 Zeichnen. Lithographie von Maurits Escher, 1948. Haags Gemeentmuseum, Den Haag, mit freundlicher Genehmigung.

Fig. 2 Drawing hands. Lithograph by Maurits C. Escher, 1948. Haags Gemeentmuseum, The Hague, with kind permission

gung steckt ebenfalls in diesem Bild. Es ist zu beachten, dass die beiden Hände nicht identisch sind. Natürlich können linke und rechte Hand nicht deckungsgleich sein. Aber es sind auch keine genauen Spiegelbilder. Die linke Hand hält den Stift etwas linkischer als die rechte, und auch sonst unterscheidet sie sich in kleinen Details von ihrer Kopie bzw. Vorlage. Solche kleinen Ungenauigkeiten im Kopiermechanismus sind der Motor für die Entwicklung des Lebens. Eine dritte Bedingung ist offenkundig: dieses Paradox konnte nur dank dem Auge und dem Stift eines Schöpfers entstehen, in diesem Fall Maurits Escher. Wie diese Feststellung auf die Frage der Entstehung des Lebens zu übertragen sei, muss Glaubenssache bleiben. Wenn im folgenden vom Zufall die Rede ist, brauchen wir jedenfalls die Möglichkeit nicht auszuschliessen, dass die Weisheit des Schöpfers ein derartiges Ereignis vorsah oder wenigstens zuliess und so zu dem Wunder führte, das wir heute Leben nennen.

Fassen wir den Bildinhalt nochmals zusammen (Bild 3a). Eine Hand dient zugleich als Vorlage und als Kopierinstrument. Wir könnten so den Kreis bereits schliessen in der Meinung, dass die Hand ein Selbstbildnis anfertigt, das Selbstbildnis wieder ein Selbstbildnis und so weiter. Damit treffen wir aber Eschers Gedanken noch nicht ganz. Selbstbildnisse werden mit Hilfe von Spiegeln angefertigt. Auch in diesem Bild ist ein Spiegel versteckt; denn die linke und die rechte Hand sind Spiegelbilder (Bild 3b). Beide erfüllen eine Doppelfunktion: sie dienen als Vorlage und Kopierinstrument, aber jetzt können sie einander in diesen Funktionen ablösen. Die eine Hand kopiert, während die andere Modell sitzt.

2.1 Selbstvermehrung der Viren und Viroide

Auf den einfachsten Nenner gebracht, vermehren viele Viren ihre Erbsubstanz nach demselben Schema (Bild 3c). An die Stelle der rechten und linken Hand tritt die Plus- und Minus-RNA. Es sind nicht Spiegelbilder, sondern komplementäre Moleküle, wie aufeinander passende Gipsabdrücke. Das liegt in der

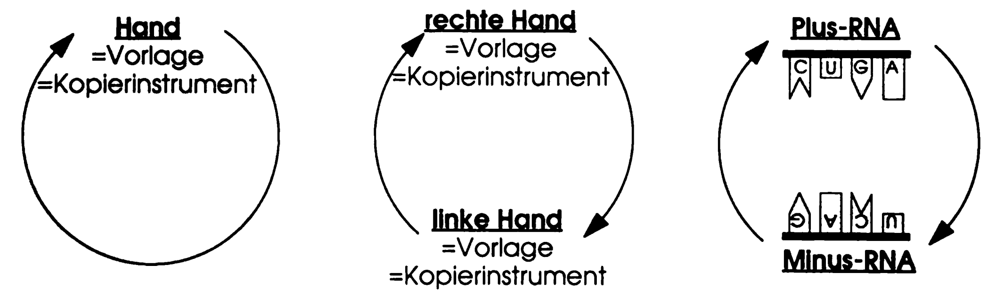


Bild 3 Interpretation des vorangehenden Bildes. (a) einfacher Kreis, (b) mit Spiegelung, (c) Anwendung auf die RNA-Replikation.

Fig. 3 Interpretation of the preceding figure. (a) simple circle, (b) including mirror image, (c) applied to RNA replication.

chemischen Natur der vier Bausteine; C passt nur auf G, und A passt nur auf U nach der Regel der Basenpaarung. Ohne auf Details einzutreten, sind mit Bezug auf Eschers Bild zwei grundsätzliche Fragen zu stellen: Können diese RNA-Moleküle als Vorlage dienen? Sind sie als Kopierinstrumente brauchbar?

Dass sich die RNA als Vorlage eignet, geht aus der Basenpaarungsregel hervor. Zwar lässt die einmalige Anwendung dieser Regel aus CUGA einen neuen Text entstehen, nämlich UCAG, in dem die Vorlage kaum zu erkennen ist. Die zweimalige Anwendung der Regel jedoch produziert eine identische Kopie von CUGA. So lassen sich beliebige Abfolgen dieser vier Bausteine kopieren, zum Beispiel die 8500 Bausteine der MKS-RNA.

Die zweite Frage nach den Kopierinstrumenten ist schwieriger zu beantworten. Wo ist die Hand, welche die Bausteine aneinanderreiht? Ist es die RNA selbst? Das wurde früher für unmöglich gehalten. Viren sind nur in lebenden Zellen vermehrungsfähig, weil sie für die RNA-Synthese Enzyme benötigen. Jedermann wusste, dass Enzyme aus Protein bestehen und dass nur lebende Zellen zur Proteinsynthese befähigt sind. Vor zehn Jahren wurden aber in Wimpertierchen erstmals Enzyme nachgewiesen, die ausschliesslich aus RNA bestehen; sie wurden deshalb «Ribozyme» genannt (T.R. Cech and B.L. Bass, 1986). Wie bei anderen bahnbrechenden Entdeckungen konnte man bald zeigen, dass die Ribozyme nicht auf Wimpertierchen beschränkt, sondern von allgemeiner biologischer Bedeutung sind.

Besonders aufschlussreich für das hier besprochene Thema sind die Viroide (T.O. Diener, 1988). Der Name besagt, dass es sich nicht um eigentliche Viren handelt, sondern um virusähnliche Einheiten. Viroide sind die zweitkleinsten infektiösen Krankheitserreger und befallen hauptsächlich Kulturpflanzen. (Die kleinsten Erreger sind die Prionen, welche u.a. die bovine spongiforme Enzephalopathie, den «Rinderwahnsinn», hervorrufen.) Viroide können eine grosse Wirkung entfalten und beträchtliche wirtschaftliche Schäden verursachen; dennoch bestehen sie lediglich aus einer RNA mit einigen hundert Bausteinen, die zu einer geschlossenen Kette verknüpft sind. Was die Viroide von den Viren unterscheidet, ist das Fehlen einer Proteinhülle. Was sie mit den Viren verbindet, ist die in der RNA enthaltene Instruktion zur Selbstvermehrung, zur Replikation. Sie funktioniert in sechs Schritten nach dem Modell des «rollenden Kreises» (Bild 4). Von der zirkulären Plus-RNA oben im Schema wird im Schritt 1 eine lineare Kopie angefertigt, die mehr als einfache Kreislänge aufweist. Im Schritt 2 wird die RNA auf die richtige Länge zugeschnitten, und im Schritt 3 wird sie zu einem neuen Kreis zusammengefügt. Ein aus dem Alltag gegriffenes Bild wäre das Abrollen einer WC-Papierrolle und das Abtrennen der Coupons, ein nicht ganz stubenreiner Vergleich, weil man sich zusätzlich vorstellen müsste, dass das Papier im Innern der Rolle laufend neu fabriziert wird. Die Schritte 4 bis 6 sind einfach zu erklären. Sie sind das Spiegelbild von Schritt 1 bis 3 wie im einfacheren Bild 3c.

Es wurde nachgewiesen, dass Schritt 2, die Spaltung der RNA, nicht von einem Protein ausgeführt wird, sondern von einem Ribozym, und zwar von der

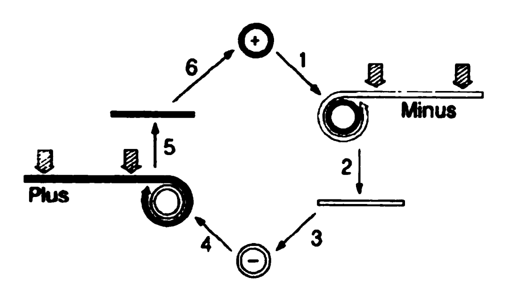


Bild 4 Replikation einer zirkulären pathogenen RNA nach dem Modell des «rollenden Kreises». Die Minus-RNA spaltet sich selbst in Schritt 2, und die Plus-RNA in Schritt 5 (Symons, 1989). R.H. Symons, 1989, mit Genehmigung.

Fig. 4 Rolling circle model for the replication of a circular pathogenic RNA. Self-cleavage of minus-RNA occurs in step 2, and of plus-RNA, in step 5 (Symons, 1989). R.H. Symons, 1989, with permission.

Viroid-RNA selbst (R.H. Symons, 1989). Könnten wir dasselbe von Schritt 1 und 3 behaupten, so wären die Bedingungen für ein autonomes System der Selbstvermehrung erfüllt. Die Viroide sind nicht autonom, sondern lassen sich Schritt 1 und 3 durch konventionelle Enzyme der Wirtspflanze ausführen. Diese Schritte sind jedoch nicht grundsätzlich unmöglich für Ribozyme; es handelt sich um Verknüpfungsreaktionen, also einfach um die Umkehrung von Spaltungen, und solche wurden bei bestimmten Ribozymen bereits nachgewiesen. Man könnte sich also vorstellen, dass ein Chemiker sich die Kenntnisse über Ribozyme zunutze macht, eine RNA mit den passenden Eigenschaften herstellt, sie zusammen mit einer Lösung der vier Bausteine in ein Reagenzglas gibt und die RNA zur Vermehrung bringt, solange die Bausteine reichen.

Geht es auch ohne Chemiker? Wie konnte denn in der ersten Jahrmilliarde der Erdgeschichte das allererste sich replizierende RNA-Molekül entstehen? Wie gesagt konnten die Bausteine des Lebens in der präbiotischen Suppe vermutlich spontan entstehen. Auch die spontane chemische Bildung kurzer RNA-Ketten mit zufälliger Basensequenz liegt im Bereich des Möglichen. Jedoch scheint es äusserst unwahrscheinlich, dass daraus «lebensfähige» Moleküle entstehen, wie folgende Rechnung veranschaulicht. Eine Jahrmilliarde sind etwa 3×10^{16} sec. Die Erdoberfläche umfasst etwa 5×10^{14} m^2. Das kürzeste bekannte Ribozym hat eine Kettenlänge von 50 Bausteinen. Es gibt 4^{50}, das sind etwa 10^{30} verschiedene Möglichkeiten, die Bausteine aneinanderzureihen. Um alle Möglichkeiten durchzuspielen, müsste während einer Jahrmilliarde in jeder Sekunde auf jedem Quadratmeter der Erdoberfläche spontan eine RNA mit 50 Bausteinen entstanden sein. Darunter sollte sich das bereits bekannte Ribozym befinden, sicherlich auch manche neue, unbekannte.

Die Rechnung taugt nicht als Beweis; denn sie ist ebenso hypothetisch wie: «Wenn Michelangelo siamesischer Zwilling gewesen wäre, hätte er die Sixtinische Kapelle in der halben Zeit fertiggestellt.» Sie will bloss vor Augen führen, dass die einmalige Entstehung eines replikationsfähigen Moleküls im Zeitraum einer Jahrmilliarde kein Ding der Unmöglichkeit war. Einige Gründe sprechen dafür, dass dieses Molekül aus RNA bestand und virusähnliche Eigenschaften besass; ob sich das je beweisen lässt, ist fraglich. Dass wirklich ein derartiges Molekül entstanden ist, dafür muss die Existenz des Lebens Beweis genug sein.

2.2 Evolution

Die Entstehung des ersten Replikator-Moleküls war wohl das bedeutendste Ereignis der Erdgeschichte, eine wahre Revolution. Die folgenden 3½ Milliarden Jahre waren geprägt von *Evolution* (H. Fey, 1986). Charles Darwin (H. Burla, 1959) war kein Genetiker und wusste noch nichts von RNA. Dennoch lässt sich sein Prinzip der natürlichen Zuchtwahl, 1859 veröffentlicht (Bild 5), ohne weiteres auf den Beginn der Evolution anwenden. Nehmen wir an, das erste Replikator-Molekül sei entstanden und habe die elf Kopien A–L unten im Bild produziert. Kein Kopiermechanismus ist perfekt; schon gar nicht ein eben erst zufällig entstandener. Die Moleküle A–L sind also mehr oder weniger voneinander verschieden. Die meisten Änderungen stellen einen Nachteil dar und führen zum Aussterben der betreffenden Moleküle. Nur wenigen gelingt es, ihre Vermehrungsfähigkeit zu halten oder gar zu steigern. So entstehen die Zweige A und I, deren Triebe sich nun auseinanderentwickeln.

Wir verwenden das Bild eines Stammbaumes, obwohl wir von einzelnen Molekülen sprechen. Wie kommen wir zu den Bakterien, Pflanzen und Tieren? Gewisse Moleküle entwickelten die Fähigkeit, sich andere einzuverleiben, als Nahrung und zugleich Ausschaltung der Konkurrenz. Andere begannen sich dagegen zu schützen, indem sie sich zu einer Lebensgemeinschaft zusammengesellten und um sich herum eine Hülle bildeten. So entstanden die ersten

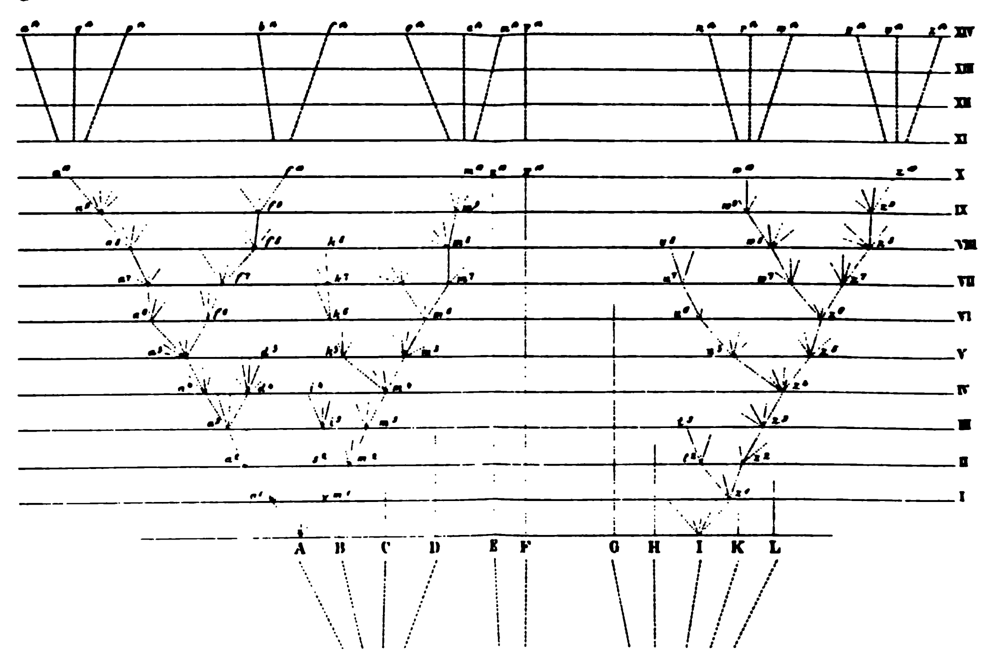


Bild 5 Darwins Prinzip der natürlichen Zuchtwahl (Schema von 1859).

Fig. 5 Darwin's principle of natural selection (illustration of 1859).

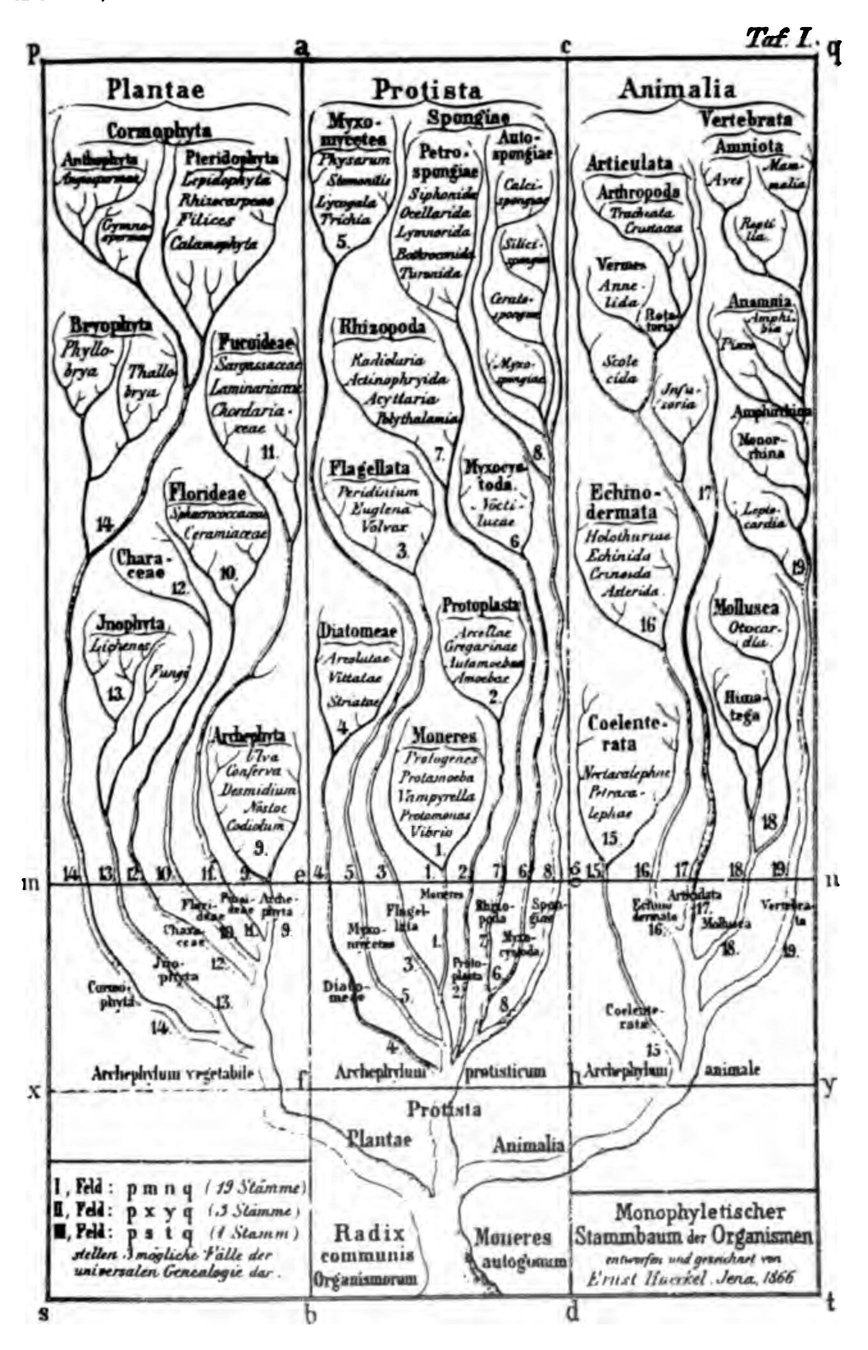


Bild 6 Haeckels Stammbaum aller Arten (1866).

Fig. 6 Haeckel's evolutionary tree of all species (1866).

Zellen. Bestimmte Zellen fügten sich zu ganzen Organismen zusammen. Eine grosse Vielfalt von Lebensformen entstand (R. Dawkins, 1989).

Ein eifriger Verfechter des Darwinismus, Ernst Haeckel, hat 1866 einen Stammbaum aller Arten aufgestellt (Bild 6). Einiges gilt noch heute (C.R. Woese, 1987), so der gemeinsame Ursprung, die *Radix communis organismorum*. Zu beachten ist, wie der Mensch schon damals auf den ihm gebührenden Platz verwiesen wurde. In der oberen rechten Ecke finden sich neben den Vögeln und Reptilien in kleiner Schrift die *Mammalia*, die Säugetiere. Einzelne Abkömmlinge, auch der Mensch, sind nicht erwähnenswert. Heute ist unser Platz in der Evolutionslehre noch prekärer geworden (Bild 7). Dieser moderne Stammbaum ist von oben zu betrachten; die gemeinsame Wurzel steht etwa in der Mitte, und die Länge der Zweige zeigt den Grad der Verwandtschaft an. Wo sind Haeckels drei Königreiche geblieben, die *Planta*, *Protista* und *Animalia*? Wiederum in der rechten oberen Ecke sind die Pflanzen und Tiere voneinander durch eine kleine Verzweigung getrennt, die auf etwa eine Milliarde Jahre zu datieren ist. Die Pflanzen und Tiere sind bloss noch ein Teil des Eukaryonten-Königreiches, das zusätzlich die Pilze, Wimpertierchen, Geisseltierchen und Mikrosporidien umfasst. Dafür bestehen jetzt zwei neue Königreiche, die Eubakterien und die Archaebakterien. Zu den letzteren gehören die Bewohner vulkanischer Quellen, die nur bei Temperaturen um 100° C richtig gedeihen. Sie lieben Schwefel, und Sauerstoff ist für sie Gift. Sie stehen vermutlich dem hypothetischen Urorganismus etwas näher, weil ihre Evolution langsamer ist und sie die ursprünglich auf der Erde vorherrschenden Bedingungen bevorzugen.

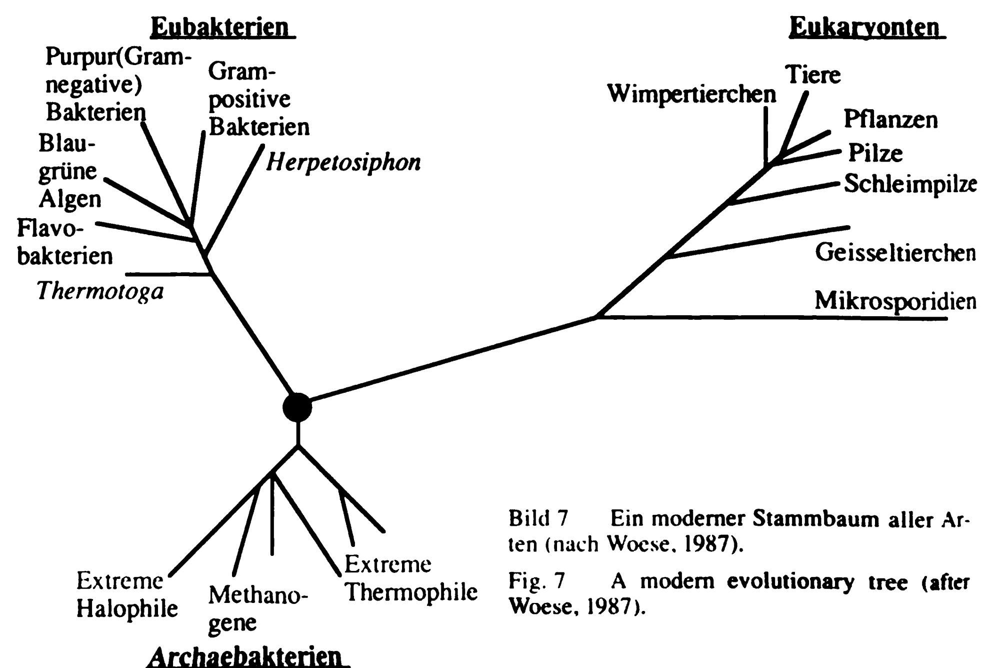


Bild 7 Ein moderner Stammbaum aller Arten (nach Woese, 1987).

Fig. 7 A modern evolutionary tree (after Woese, 1987).

3 Theorien zur Entstehung der Viren

Wie passen die Viren in dieses Schema? Im Stammbaum von 1866 werden wir sie nicht finden; denn erst 30 Jahre nach Haeckel wurden die ersten Viren nachgewiesen, fast gleichzeitig das Tabakmosaikvirus, ein Pflanzenvirus (M.W. Beijerinck, 1898), und der Erreger der Maul- und Klauenseuche (F. Loeffler und P. Frosch, 1897). Aber auch der moderne Stammbaum rechts enthält keine Viren, weder an der Wurzel noch irgendwo in den Zweigen. Der Grund ist, dass Viren in jedem dieser Organismen versteckt sein können. Viren befallen Tiere, Pflanzen, Pilze, Geisseltierchen. Auch Bakterienviren, sogenannte Bakteriophagen, sind schon lange bekannt, und kürzlich wurden Viren in Archaebakterien nachgewiesen. Die Skizzen (Bild 8) zeigen einige Beispiele aus der Formenvielfalt der Viren. Die Nr. 1 ganz links stellt ein Viroid dar. Es ist hier kaum zu erkennen; dabei sollte es im gewählten Massstab noch kleiner sein. Nr. 2 ist das erwähnte MKS-Virus, und auf Nr. 6, das Grippevirus, komme ich noch zu sprechen. Nr. 7 ist das Virus der Tollwut. Das Pockenvirus, Nr. 9, ist das einzige Virus, welches in einem gewöhnlichen Lichtmikroskop sichtbar wird. Um das Ganze ist im selben Massstab eine Bakterienzelle gezeichnet, die etwa ein Tausendstelmillimeter lang ist.

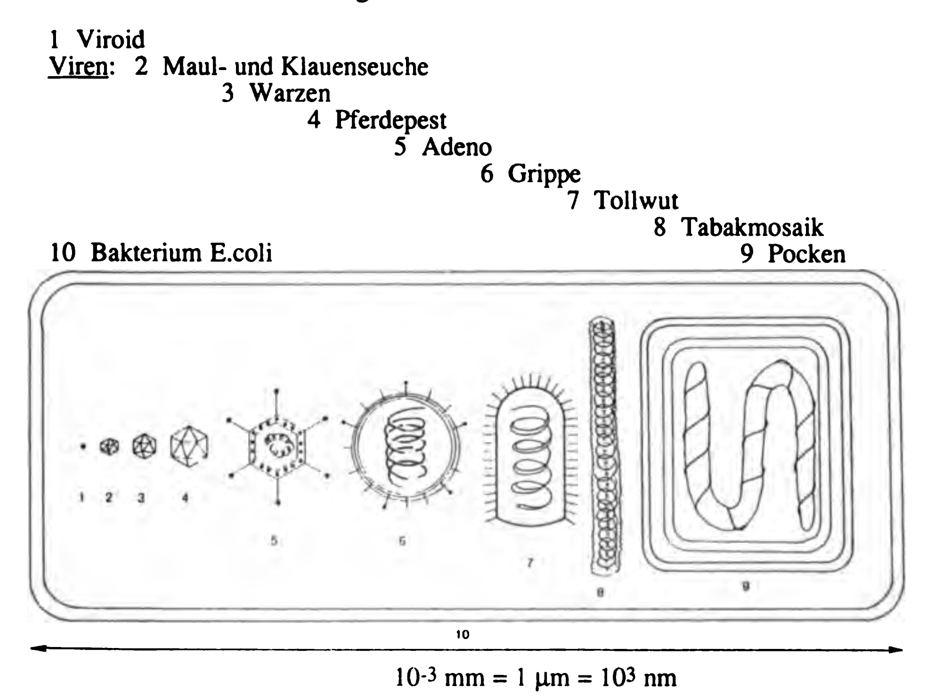


Bild 8 Skizzen zur Formenvielfalt der Viren; Grössenvergleich mit einem Bakterium.

Fig. 8 Sketches of virus morphology and diversity; size comparison with a bacterium.

Die Vielfalt der Viren und Wirtsorganismen sollte eigentlich kein Grund für einen Ausschluss aus dem Stammbaum sein. Unsere Kollegen, die Parasitologen, haben ihre Geisseltierchen, Würmer und Amöben längst im Stammbaum untergebracht, obwohl es sich ebenfalls um Bewohner verschiedenster Wirtsorganismen handelt. Weshalb gelingt dies den Virologen nicht? Sie sind sich zwar einig, was Viren sind, aber nicht, woher sie kommen.
Drei Theorien stehen miteinander in Konkurrenz (E.G. Strauss, J.H. Strauss and A.J. Levine, 1990). Für jede lassen sich gute Argumente finden.

3.1 Primordial

Wir haben gesehen, dass die Entstehung des Lebens auf der Bildung replikationsfähiger Moleküle beruhte, die möglicherweise die Eigenschaften von Ribozymen hatten. Bald danach muss die Proteinsynthese entstanden sein, ohne die heute kein Leben mehr möglich ist. Später wurde die RNA als Informationsträger durch die stabilere DNA ersetzt. Hauptmerkmale der Viren sind ihre Replikationsfähigkeit und das Fehlen einer eigenen Proteinsynthese. Besonders diejenigen Viren, welche RNA enthalten, könnten deshalb Überreste aus jener fernen Zeit darstellen und sich zusammen mit den Wirtsorganismen weiter entwickelt haben.

3.2 Regressiv

Es wäre auch möglich, dass die Viren ursprünglich vollständige Mikroorganismen waren, welche die Fähigkeit zur Proteinsynthese wegen ihrer parasitären Lebensweise aufgaben. Solche Regressionen sind in der Natur häufig. Ein berühmtes Beispiel sind die Mitochondrien, ursprünglich einmal autonome Mikroorganismen, die sich im Innern unserer Zellen angesiedelt haben und für den Energiehaushalt sorgen. Heute sind sie ein derart fester Zellbestandteil, dass keines ohne das andere lebensfähig ist. Die Mitochondrien haben sich ein gewisses Mass an Autonomie bewahrt, indem sie eine eigene DNA mitbringen. Die regressive Theorie dürfte am ehesten auf die Pockenviren zutreffen, da sie ebenfalls DNA enthalten und relativ autonom sind. Die RNA-Viren wären damit schwieriger zu erklären.

3.3 Abtrünnig

Eine dritte Hypothese sagt, dass Viren neueren Ursprungs sind und Genabschnitte darstellen, die sich vom Organismus abgekoppelt haben. Gene unterliegen naturgemäss vielen Veränderungen, sonst gäbe es keine Evolution. Neben punktweise auftretenden Mutationen kommen auch sprunghafte Veränderun-:n vor, wo ganze Gene oder Gengruppen ihren Platz wechseln. Auch bestimm-Viren sind fähig, in Wirts-DNA hinein und auch wieder herauszuhüpfen, so m Beispiel die Retroviren, wozu der Aids-Erreger gehört. Gelegentlich wer-

den virale Gene dabei von einem zellulären Gen begleitet. So liegt der Gedanke nahe, dass ursprünglich alle viralen Gene aus der Zelle herausgeschnitten wurden. Ein anderes Beispiel, die Herpesviren, enthalten mindestens ein Dutzend Gene, die von zellulären Genen abgeleitet sind. Die Herpesviren werden übrigens am Institut für Virologie intensiv erforscht (R. Wyler, M. Engels und A.E. Metzler, 1986; R. Wyler, M. Engels and M. Schwyzer, 1989), sind aber hier mit Absicht nur am Rande erwähnt.

4 Virusevolution am Beispiel der Influenza

Die Grippe oder Influenza ist allen wohlbekannt (F.M. Burnet, 1988). Unvermittelt kommt die Krankheit angeflogen und wirft uns mit Fieberkrämpfen zu Bett. Neue Untersuchungen zeigen, dann «angeflogen» durchaus wörtlich zu nehmen ist. Die Influenzaviren haben wir nicht dem Einfluss der Sterne zu verdanken, wie man früher glaubte, sondern Zugvögeln.

4.1 Epidemiologie

Die spanische Grippe von 1918/19 war eine Pandemie, also eine weltweite Epidemie, die damals 20 Millionen Tote forderte, mehr als der ganze 1. Weltkrieg. Es war historisch der schlimmste, aber nicht der einzige Ausbruch. Weitere Pandemien traten in den Jahren 1933, 57 und 68 auf, und auch in früheren Jahrhunderten sind sie bezeugt, so 1562 in England. Normalerweise zieht eine Pandemie in einem einzigen Winter vorbei; im nächsten Winter sind kaum noch Grippeopfer zu beklagen, und zwar aus folgenden Gründen. Das Influenzavirus zeigt eine hohe Transmissionsrate. Das heisst, wer mit Grippekranken in Berührung kommt, hat eine gute Chance, die Grippe auch zu erwischen. Das Virus hat eine kurze Generationszeit, Das heisst, vom Zeitpunkt, wo man sich infiziert hat bis zum Zeitpunkt, wo man selbst das Virus ausscheidet, vergehen nur einige Tage. Heimtückisch ist, dass man zunächst noch keine Symptome erkennt und deshalb das Virus weitergibt, bevor man selbst im Bett liegt: die Inkubationszeit ist länger als die Generationszeit. Drittens sind die Virusproteine immunogen. Das heisst, der betroffene Körper erkennt sie als fremd und beginnt, Antikörper gegen sie zu richten. Die Folge ist, dass innert einem Winter die ganze Bevölkerung durchseucht ist. Nun verhindern die entstandenen Antikörper alle Neuinfektionen. Man darf sich fragen, weshalb das Influenzavirus in diesem Zeitpunkt nicht ausstirbt. Die Infektkette sollte jetzt eigentlich unterbrochen sein.

Ein Hinweis kommt von den Tieren. Auch sie haben ihre Influenzaviren, z.B. Pferd, Schwein, Seehund und allerlei Vögel. Diese Erreger sind wirtsspezifisch, das heisst, wenn ein grippekrankes Pferd seinen Halter anniest, bekommt dieser keine Grippe, und das Pferd im umgekehrten Fall auch nicht. Diese Regel hält aber nicht absolut dicht. Die Übertragung von Schweineinfluenza auf den

Menschen ist schon nachgewiesen worden; ebenso von Geflügel auf Schweine. Der Verdacht eines gelegentlichen Durchbruches der Wirtsschranke hat sich in jüngster Zeit durch molekulare Analysen erhärtet.

4.2 Molekularer Stammbaum

Das Influenzavirus wurde erstmals 1933 isoliert; heute befinden sich Hunderte von Isolaten humaner und animaler Influenzaviren in den Kühlschränken der Forscher. Seit einigen Jahren ist es zunehmend einfacher geworden, die Abfolge der Bausteine oder Nukleotid-Sequenz in der Virus-RNA zu bestimmen. Für etwa 20 Isolate ist die Sequenzanalyse durchgeführt worden (O.T. Gorman et al., 1990). Folgende Schlüsse konnten daraus gezogen werden (Bild 9):

Die Sequenzen weisen untereinander grosse Ähnlichkeiten auf. Wenn ein Isolat an einer bestimmten Stelle die Sequenz GGC UCC zeigt, so findet man bei einem anderen GGU UCC. Bekanntlich enthält jeweils die Abfolge von drei Nukleotiden, ein Triplett, die Information für die Plazierung einer Aminosäure im betreffenden Virusprotein, hier unter die Nukleotidsequenz geschrieben. Verschiedene Tripletts können dieselbe Aminosäure bestimmen. Deshalb ist die Ähnlichkeit auf der Ebene der Aminosäuren noch grösser. Vergleich zweier Sequenzen zeigt immer auch Punktmutationen, die über die ganze Virus-RNA verteilt sind. Sie entstehen dadurch, dass die Virusenzyme gelegentlich Kopierfehler machen. Ungefähr ein Nukleotid aus 10000 ist falsch, und dieser Fehler verewigt sich.

Je weniger Unterschiede, desto näher sind zwei Isolate miteinander verwandt. Es lässt sich ein Stammbaum aufstellen. Im gezeigten Beispiel genügt je eine Mutation, um von der Sequenz links zu den Sequenzen rechts oben oder rechts unten zu gelangen. Diese beiden liegen aber um zwei Mutationen auseinander. (Ein klassischer Philologe bedient sich derselben Argumentation, um zu

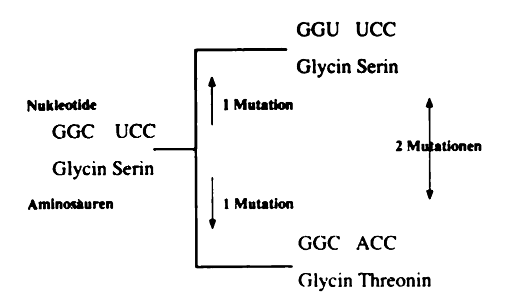


Bild 9 Erklärung eines molekularen Stammbaumes anhand einfacher Nukleotid- und Aminosäuresequenzen.

Fig. 9 Explanation of a phylogenetic tree using simple nucleotide and amino acid sequences.

:immen, welche Handschrift eines griechischen Autors von welcher anderen ıdschrift abgeschrieben worden ist.) Von der Wurzel des Stammbaumes .es ausgehend (Bild 10), findet man zuerst die Aufspaltung in ein Isolat von fluenza und in alle anderen Isolate. In einem zweiten Schritt trennen chiedene Vogelisolate von den übrigen. Beim dritten Schritt bleiben

alle Schweine- und Menschenviren auf der einen Seite und diverse Pferde-, Seehund- und Geflügelviren auf der anderen.

Dies ist nur ein Stammbaum von vielen. Zusammen mit vielerlei Hinweisen aus der Biologie des Virus lässt sich heute ein Szenario zur Entstehung der Spanischen Grippe postulieren, obwohl von 1918 gar keine Isolate existieren. Danach ist das eigentliche Virusreservoir in Zugvögeln, besonders Meeresbewohnern, zu suchen, wo die Infektion endemisch und symptomlos ist, aber das

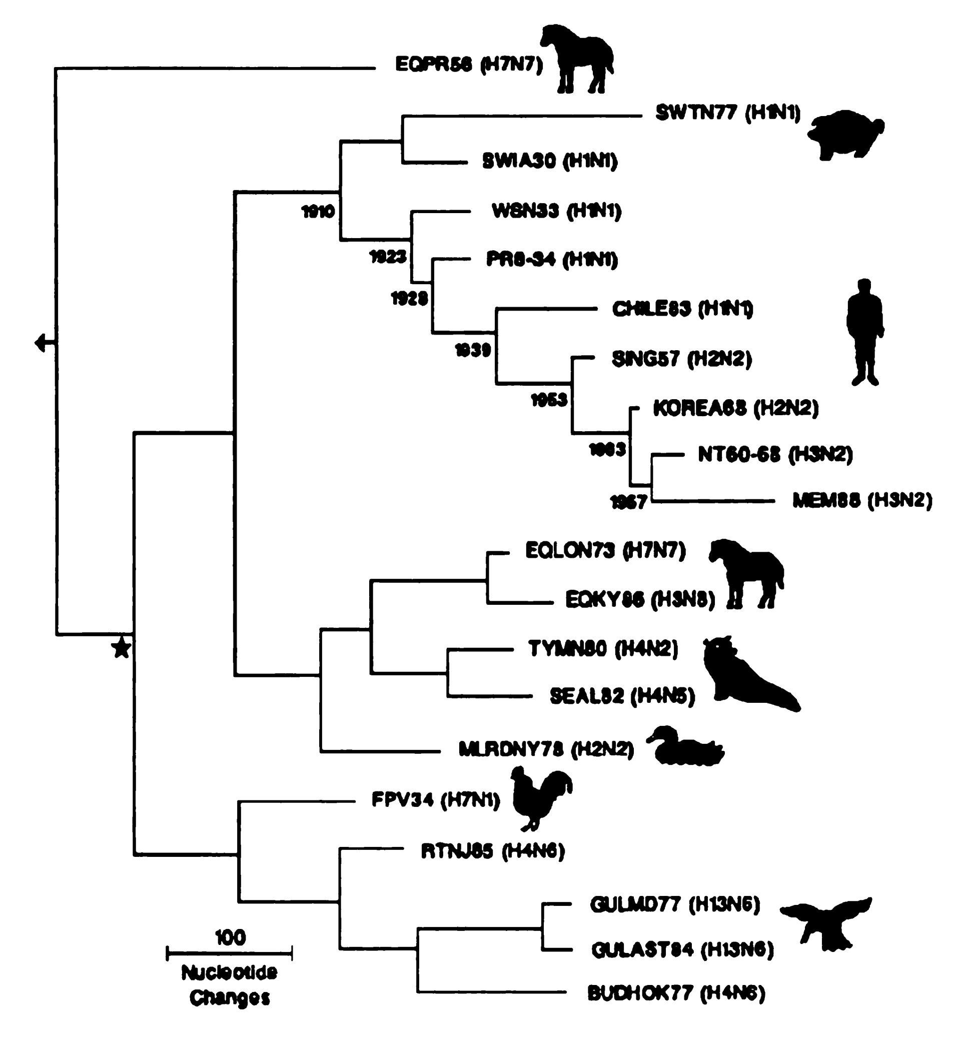


Bild 10 Molekularer Stammbaum von 20 Polymerase-Genen (PB2) von Influenzavirus-A-Isolaten (Gorman et al., 1990). O. T. Gorman et al., 1990, mit Genehmigung.

Fig. 10 Phylogenetic tree of 20 polymerase (PB2) genes from influenza A isolates (Gorman et al., 1990). O.T. Gorman et al., 1990, with permission.

Virus in grosser Menge ausgeschieden und infolge der Wanderungen über grosse Distanzen verteilt wird. Ein Albatros kann dreiwöchige Ausflüge von seinem Brutplatz aus unternehmen und in dieser Zeit bis zu 15 000 km zurücklegen (P. Jouventin and H. Weimerskirch, 1990). Nach der weltweiten Streuung durch derartige Hochleistungsvögel erfolgt die Feinverteilung des Virus vermutlich durch einheimisches Geflügel. Ungefähr nach 1910 muss ein Vogelvirus in die Schweinepopulation gelangt sein. Nach einigen Jahren der Adaptation im Säugerwirt gelang ihm der Sprung in den Menschen, dessen Immunsystem auf diesen neuen Typ nicht vorbereitet war.

5 Schlussfolgerungen

Am Beispiel der Maul- und Klauenseuche wurde gezeigt, dass die heute bestehenden Viren auf dem Weg ununterbrochener Infektketten von Wirt zu Wirt zu uns gekommen sind. Der Wirt braucht nicht immer dieselbe Spezies zu sein. Im Gegenteil, Wirtswechsel können auch bei wirtsspezifischen Viren gelegentlich vorkommen und verheerende Folgen haben. Zudem ist offensichtlich, dass Humanmediziner auch die tierischen Viren kennen sollten und Veterinärmediziner die humanen.

Die Erbsubstanz der Viren entwickelt sich viel rascher als diejenige ihrer Wirte (Strauss et al., 1990). Im gezeigten Influenza-Stammbaum ist seit 1910 jedes Jahr ca. ein Nukleotid aus 1000 durch ein anderes ersetzt worden (Bild 11). Eine vergleichbare Änderung in Säugetiergenen läge statt 80 Jahre etwa 80 Millionen Jahre zurück, also tief in der Kreidezeit, etwa bei der Abspaltung der

Bild 11 Die Evolution der Influenzaviren verläuft rund eine Million mal schneller als die der Wirtsorganismen.

Fig. 11 Rate of evolution of influenza viruses is roughly a million times higher than that of their hosts.

Beuteltiere von den Säugetieren. Heisst das nun, dass die Viren erst vor wenigen Jahrtausenden entstanden sind und früher paradiesische Verhältnisse herrschten, ohne Angst vor Aids, Herpes und Pocken? Die Geschichte sagt, dass die Pocken schon im alten China auftraten. Im übrigen sind wir auf Vermutungen ngewiesen.

Stammbaumvergleiche wie innerhalb von Influenza sind auch zwischen nzelnen Virusfamilien durchgeführt worden (J.H. Strauss and E.G. Strauss,

1988) und deuten darauf hin, dass der gemeinsame Vorfahre der RNA-Virusfamilien kaum mehr als 10000 Jahre alt ist. Das Beispiel der Influenza lässt vermuten, dass die RNA-Viren zwar keine neue Erfindung darstellen, dass aber die alten RNA-Viren wegen der hohen Mutationsrate durch neue verdrängt worden sind. In jüngster Zeit hat auch die Zivilisation einen Beitrag geleistet. Die Haustierhaltung ist geschichtlich nicht alt und kann den Viren neue Wege geöffnet haben. Immer schneller dreht sich das Rad. Die erst in diesem Jahrhundert gewonnenen Erkenntnisse erlauben dem Menschen, manche Viren zu bekämpfen. Vielen anderen Viren hat der Mensch jedoch durch sein Verhalten eine neue Chance gegeben. So kann die intensive Tierhaltung die Verbreitung der animalen Viren fördern, und dasselbe gilt wegen Übervölkerung und Tourismus für die humanen Viren. Oft hat eine Verbreitung ganz banale Ursachen. So wurde ein gefährliches, hämorrhagisches Fieber verursachendes Virus von Asien nach den USA importiert, und zwar mit gebrauchten Autoreifen, die in ihrem Innern Mücken als Virusträger beherbergten (S.S. Morse and A. Schluederberg, 1990). Kein Forschungszweig ist vor Missbräuchen gefeit. Es kann jedoch keine Rede davon sein, dass die Virologie bezweckt, künstlich neue gefährliche Viren herzustellen[2]; denn die Forscher haben alle Hände voll zu tun mit der Bekämpfung natürlich auftretender Viren.

Was war zuerst, das Virus oder der Wirt? Nach unseren heutigen Kenntnissen war der *Wirt* zuerst. Mindestens gilt das für die heutigen Virusfamilien einschliesslich der Viroide, die samt und sonders auf ihren Wirt angewiesen sind und offenbar eine erstaunlich kurze und heftige Geschichte durchgemacht haben. Wie bei der Frage nach dem Huhn und dem Ei bleibt ein Paradox bestehen. Zwar nicht das Virus, aber das *Prinzip seiner Vermehrung*, könnte am Anfang des Lebens gestanden sein.

[2] So z.B. ein Votum im Zürcher Kantonsrat am 14.1.91

6 Literatur

Beijerinck, M.W. (1898). Über ein Contagium vivum fluidum als Ursache der Fleckenkrankheit der Tabaksblätter. Zentbl. Bakt. ParasitKde. Abt. II 5: 27.

Brooksby, J.B. (1988). Foot-and-Mouth disease virus. In: F. Fenner and A. Gibbs, Portraits of viruses. A history of virology. Karger Basel, pp. 124–146.

Burla, H. (1959). Darwin und sein Werk. Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich *103*: 6 (161. Neujahrsblatt), 74 Seiten.

Burnet, F.M. (1988). Influenza Virus A. In: F. Fenner and A. Gibbs, Portraits of viruses. A history of virology. Karger Basel, pp. 24–37.

Cech, T.R., and Bass, B.L. (1986). Biological catalysis by RNA. Annu. Rev. Biochem. *55*: 599–629.

Dawkins, R. (1989). The selfish gene, 2nd ed. Oxford University Press, Oxford & New York, 352 pages.

Diener, T.O. (1988). The Viroid. In: F. Fenner and A. Gibbs, Portraits of viruses. A history of virology. Karger Basel, pp. 189–204.

Dill, R.F., Shinn, E.A., Jones, A.T., Kelly, K., and Steinen, R.P. (1986). Giant subtidal stromatolites forming in normal salinity waters. Nature *324*: 55–58.

Ernst, B. (1982). Der Zauberspiegel des M.C. Escher. Deutscher Taschenbuch Verlag München, 218 Seiten.

Fey, H. (1986). Die Evolution in mikrobiologischer Sicht. Schweiz. Arch. Tierheilkd. *128*: 165–183.

Gorman, O.T., Donis, R.O., Kawaoka, Y., and Webster, R.G. (1990). Evolution of Influenza-A Virus PB2 Genes – Implications for Evolution of the Ribonucleoprotein Complex and Origin of Human Influenza A Virus. J. Virol. *64*: 4893–4902.

Jouventin, P., and Weimerskirch, H. (1990). Satellite tracking of wandering albatrosses. Nature *343*: 746–748.

Loeffler, F., und Frosch, P. (1897). Summarischer Bericht über die Ergebnisse der Untersuchungen zur Erforschung der Maul- und Klauenseuche. Zentbl. Bakt. Abt. I Orig. *22*: 257.

Miller, S.L., and Orgel, L.E. (1974). The origins of life on earth. Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J.

Morse, S.S., and Schluederberg, A. (1990). Emerging viruses: The evolution of viruses and viral diseases. J. Inf. Dis. *162*: 1–7.

Pittler, H., und Bätza, H.J. (1990). Bericht über die Tierseuchensituation in der Bundesrepublik Deutschland 1989. Tierärztl. Umschau *45*: 585–596.

Press, F., and Siever, R. (1978). Earth 2nd ed. W.H. Freeman & Co. San Francisco, p. 40.

Scott, A. (1990). Zellpiraten, Birkhäuser Verlag Basel, 256 Seiten.

Strauss, E.G., Strauss, J.H., and Levine, A.J. (1990). Virus evolution. In: B. N. Fields and D. M. Knipe, Virology 2nd ed. Raven Press New York, pp. 167–190.

Strauss, J.H., and Strauss, E.G. (1988). Evolution of RNA viruses. Annu. Rev. Microbiol. *42*: 657–683.

Symons, R.H. (1989). Self-cleavage of RNA in the replication of small pathogens of plants and animals. TIBS *14*: 445–450.

Woese, C.R. (1987). Bacterial evolution. Microbiol. Rev. *51*: 221–271.

Wyler, R., Engels, M., und Metzler, A.E. (1986). Das Virus der Buchstabenseuche unter der Lupe. Vierteljahrsschr. Naturforsch. Ges. Zürich *131*: 73–91.

Wyler, R., Engels, M., and Schwyzer, M. (1989). Infectious rhinotracheitis / vulvovaginitis (BHV1). In: G. Wittmann, Herpesvirus diseases of cattle, horses, and pigs. Kluwer Acad. Publishers Boston, pp. 1–72.

PD Dr. M. Schwyzer, Institut für Virologie, Vet.-med. Fakultät, Universität Zürich, Winterthurerstr. 266a, 8057 Zürich

hbesprechungen

ɔld Weber: Die Blei-Zinkerzlagerstätten :s Grazer Paläozoikums und ihr geologiher Rahmen. Archiv für Lagerstättenforhung der geologischen Bundesanstalt ınd 12, Wien 1990, öS 500.–.

ie vorliegende Studie ist sehr gründlich ımfassend. Zuerst enthält das Buch einen ıischen Überblick des Grazer Beckens mit n silurisch-devonischen Tonschiefern, die :omplizierte Deckentektonik mit Überfalzeigen. Die Blei-Zinkvererzungen liegen :sen Schiefern, und der Verfasser konnte n, dass sie exhalativ-sedimentärer Entstesind und faziel vorkommen. Die stratigrah-petrographische Beschreibung wurde Bohrproben und solchen aus Versuchsn erhärtet und mit guten Fotos im Dünnf dokumentiert. Geochemische Analysen zen die Arbeit, es wird auch auf die gene:n Probleme der Vererzung eingegangen, nd während der Diagenese. Dabei sind ische Lösungs- und Ausfällungsvorgänge ig sowie syntektonischer Magmatismus, ls Wärmequelle diente. Besondere Aufsamkeit wird den lagerstättenindikativen ıetern im Nebengestein geschenkt (S-, Sr-P-Isotope) und Spurenelemente. Breiter ı nimmt ihre statistische Auswertung ein, i die multivariante Geostatistik mit Hauptonenten-Analyse angewendet wird. Anenkarten geeigneter Elemente weisen auf zungszentren hin und werden zu wichtirospektiven Hilfsmitteln. Aerogeomagne: Aufnahmen ergänzen die Untersuchun-Rund zwei Drittel des 290seitigen Buches der lokalen Beschreibung der erzführenBereiche und ihres Bergbaues gewidmet. :rden die Gebiete östlich der Mur (Weizal – Peggau – Schrems – Rechberg) und h derselben (Arzwaldgraben–Übelbachehandelt. Die unteren Schiefer enthalten lei-Zinkvererzungen, die oberen zusätzPyritvorkommen. Zahlreiche geologische n und -profile, Bohrprofile, Dünnschliffhmen, Fotos von Erzparagenesen im Stolınd Stollenpläne bereichern das Buch. eich sind Mineralstrukturdiagramme. Der sser arbeitete mit Unterstützung der Bleir Bergwerksunion und beteiligte sich an Explorationsforschungen. Nebst der Verarbeitung von noch unveröffentlichten Akten verarbeitete er viel eigenes Material aus Labor- und Feldforschung. Das Ganze darf als Frucht mehr als 10jähriger Arbeit betrachtet werden. Ein Lagerstättengeologe kann nicht an diesem Buch vorbeigehen, ohne es gründlich zu lesen, für Studierende der Geologie bildet das erste Drittel Wertvolles bezüglich Prospektionsmethodik. Ein grosses Literatur-Verzeichnis und historische Angaben über den Bergbau seit dem 12. Jh. bis in die heutigen Tage runden das Werk ab.

Georg Jung

Heini Hediger: Ein Leben mit Tieren im Zoo und in aller Welt. Werd Verlag, Zürich. 1990, 502 S., Fr. 68.–.

Der bekannte, ehemalige Zoodirektor erzählt sein Leben, das er v. a. der Natur und der Tierwelt gewidmet hat. Im wesentlichen sind die wichtigsten und eindrücklichsten Beobachtungen und Gedanken eines langen und interessanten Lebens autobiographisch und in chronologischer Folge dargestellt. Es ist die Quintessenz seiner Arbeit und seiner Erfahrungen, die er hier zusammengezogen hat und an den Leser und die jüngere Generation weitergeben will. Das Schwergewicht liegt auf dem Erlebten und Fachlich-Naturwissenschaftlichen, während das Private und der Klatsch eher knapp gehalten sind. Heini Hediger beschreibt prägende Erlebnisse aus seiner Jugend- und Schulzeit, seine Forschungs- und Bildungsreisen und die Zeit als Zoodirektor mit den unvermeidlichen Problemen mit Tieren und den lieben Mitmenschen. Man erfährt eine Fülle von interessanten und oft auch merkwürdigen zoologischen Besonderheiten und Erlebnissen. Das für jedermann geschriebene Buch ist auch für Fachleute eine Fundgrube. Das umfangreiche Werk ist sorgfältig gestaltet und mit vielen, meist authentischen Bildern versehen. Bibliographie, Literatur- und Sachverzeichnis runden das Buch ab. Die Lektüre ist nie langweilig, trotz der vielen einzelnen Episoden; Hediger war schon immer ein faszinierender Erzähler. Eindrücklich erkennt man, wie sich innerhalb eines Lebensalters unsere Umwelt verändert hat. Man erfährt auch, wie sich die vom Autor begründete Tiergartenbiologie etabliert hat. Die Käfighaltung von Wildtieren ist der artgerechten Haltung in gitterlosen Biotopen gewichen; Leben in Gruppen ist die Regel. Die natürlichen

Bedürfnisse von Physiologie und Verhalten werden erfüllt. Die Tiere vermissen nichts, als Resultat sind erstaunliche Zuchterfolge möglich. Eine weitere Feststellung von Hediger: Auch für Tiere in der Natur gibt es keine grenzenlose Freiheit, vielmehr leben sie in einem starren und oft engen Raum-Zeit-System. Flucht und Kampf ums Futter sind die Regel. Ein lesenswertes Buch für Naturinteressierte. Nach der Lektüre kann ein Zoobesuch zu einem völlig neuen Erlebnis werden.

H. U. Rüegsegger

Museo cantonale di storia naturale. Introduzione al paesaggio naturale del Cantone Ticino. Band 1: Le componenti naturali. 485 Seiten. Fr. 80.–. Verkauf: Armando Dadò, editore Locarno.

Das Autorenkollektiv Guido Cotti, Markus Felber, Alessandro Fossati, Gianfelice Lucchini, Elio Steiger und Pier Luigi Zanon behandelt nach einer Einführung durch Departementsvorsteher Staatsrat Renzo Respini die Abschnitte Felsen und Fossilien, Mineralien, Relief, Klima, Vegetationsentwicklung, Pflanzen, Pilze, Tiere und wichtigste Lebensräume, gefolgt von einem Literaturverzeichnis, Sachwortverzeichnis und Ortsverzeichnis. Band 2 wird das Grundlagenmaterial, Band 3 die Massnahmen zum Schutz von Landschaft und Natur umfassen.

Der komplexe geologische Raum von Airolo bis Chiasso wird in übersichtlicher Weise dargestellt. Die Reichhaltigkeit berühmter Fundstellen rechtfertigt ein besonderes Kapitel über die rund 700 Mineralien. Die verschiedenen geologischen Formationen und die nacheiszeitliche Ausformung führten zum markanten Relief und zum komplizierten hydrogeographischen System der Bäche und Flüsse.

Das aktuelle Klima ist durch Sonnenreichtum und hohe Niederschläge charakterisiert, wobei die grossklimatische Gliederung der Bergtäler, der Seengebiete und des Mendrisiotto durch ein enges kleinklimatisches Mosaik überdeckt wird. Die nacheiszeitliche Vegetationsentwicklung wird aus Pollendiagrammen abgeleitet, verbunden mit Untersuchungen über die Rückwanderung der Tierwelt aus den südlichen Refugien.

Die Vielfalt der geologischen und orographischen Gegebenheiten und die Überschneidung mit verschiedenen Klimabereichen führte zu einem ungewöhnlichen Pflanzenreichtum. Das Tessin verfügt mit rund 1900 Pflanzenarten über 70 % der natürlichen Flora der Schweiz und wird hierin nur noch vom Wallis übertroffen. In der Tessiner Flora sind viele Charakterarten der arktisch-alpinen, der mitteleuropäischen, der subalpinen und der mediterranen Flora vertreten. Wohl ist die ursprüngliche Flora durch menschliche Einflüsse verarmt. Anderseits sind in Pärken und privaten Gärten vor allem im vergangenen Jahrhundert zahllose exotische Pflanzenarten eingeführt worden; zugleich wurde die einheimische Flora durch Samenverbreitung durch Wind, Vögel und Güterverkehr mit fremden Pflanzenarten durchmischt.

Obwohl seit 1900 um 2900 Publikationen über die Tierwelt erschienen sind, ist die Gesamtfauna des Tessins noch wenig erforscht, doch ist sie ausgesprochen vielfältig. Ist es nicht erstaunlich, dass das Tessin mit einem Anteil von nur 6,8 % der Landesfläche 75 % der Säugetiere, 70 % der Käfer- und 76 % der Brutvogelarten, 86 % der Reptilien, 75 % der Amphibien und 63 % der Libellenarten beherbergt? Mehrere stark gefährdete Arten sind heute gesamtschweizerisch nur noch im Tessin zu finden. In den Bolle di Magadino wurden in den 80er Jahren um 11 000 Vögel verschiedener Arten beringt; einzelne von ihnen wurden 10–12 Tage später in Island oder in Mali festgestellt.

Der Schlussabschnitt beschreibt charakteristische Naturareale wie Fliessgewässer, Seen und Teiche, Moore und Sümpfe, Trockenstandorte, Wälder und Hecken. Zahlreiche dieser Biotopräume sind durch Siedlungsbau, Strassenbauten oder landwirtschaftliche Intensivnutzung in dramatischem Ausmass zerstört worden. Damit wurden die Lebensmöglichkeiten der Pflanzen- und Tierwelt stark eingeengt. Anderseits haben sich ausgesprochene Kulturfolger wie Stare, Möwen, Tauben, Mäuse, Ratten extrem ausgebreitet.

Der vorliegende Band vermittelt ein ausgezeichnetes Bild dieses schönen Kantons, der auf uns Deutschschweizer, aber auch auf viele Nachbarvölker eine so grosse Anziehungskraft ausübt. Wohl hat das Tessin durch die demographische Entwicklung und die grenzenlose Motorisierung schwer gelitten und wesentlich von seiner Eigenart verloren. Zum Glück besitzt es noch in vielen Talschaften und Regionen eine reizvolle Landschaft mit einer vielfältigen Pflanzen- und Tierwelt. Schutz und Erhaltung

dieser unersetzlichen Werte bedürfen höchster Priorität.

Die Autoren haben verstanden, das Wesentliche, Einmalige der Landschaft und Natur des Tessins in einem sorgfältig redigierten Text eindrücklich zu schildern. Die vielen grossen Farbbilder und die zahlreichen Kleinbilder von Mineralien, Pilzen, Pflanzen, Tieren oder Kleinlebensräumen sind von beeindruckender Schönheit und grosser Aussagekraft. Die im Text eingeschalteten Bilder, Zeichnungen, Profile, Kartenausschnitte und Tabellen verdeutlichen den Informationsgehalt. Die Absicht, die Naturverhältnisse anhand einer sorgfältigen Analyse darzustellen, ist den Autoren hervorragend gelungen. Das Buch ist für jeden interessierten Leser von hohem Wert.

Ernst Krebs

Harald Plachter: Naturschutz. Uni-Taschenbücher 1563. G. Fischer Verlag Stuttgart, 1991. 463 S., 99 Abb., 110 Tab. DM 44.80.

Das vorliegende Buch befasst sich schwerpunktmässig mit dem Naturschutz in Mitteleuropa, vor allem in Westdeutschland, ist aber in einen grösseren globalen Zusammenhang gestellt. Die Titel der Hauptkapitel (Aufgaben und Geschichte des Naturschutzes; Globale Aspekte des Naturschutzes; Naturschutz und Landnutzung in Mitteleuropa; Naturschutzfachliche Analyse und Bewertung; Artenschutz; Flächenschutz, Pflege und Biotopneuschaffung; Neue Aspekte des Naturschutzes; Naturschutz in der Planung; Gesetzgebung; Organisation des Naturschutzes; Hinweise) geben eine Übersicht über den dargelegten Stoff. Das Werk ist klar aufgebaut, leicht verständlich und gut dokumentiert. Es eignet sich vorzüglich für naturwissenschaftlich interessierte Leser, die sich einen Überblick über die heutigen Probleme beschaffen wollen. Aber auch Leute, die sich in der Verwaltung oder in der Politik mit Naturschutz abgeben müssen, erhalten eine solide wissenschaftliche Grundlage und können sich auf umfangreiches Datenmaterial abstützen. Nützlich sind auch die zahlreichen Hinweise. Die Schweiz bleibt nur am Rande miteinbezogen, und zur Orientierung über die Gesetzgebung muss spezifisch schweizerische Literatur herangezogen werden. Trotzdem kann das Buch auch hier warm empfohlen werden. Ein Literaturverzeichnis von etwa 750 Titeln lädt zu vertieftem Studium ein.

Elias Landolt

Otto Jaag: Alor 1938 – Ein Reisebericht von Indonesien. Botanische Exkursion im südlichen Malaiischen Archipel. Meier Verlag, Schaffhausen. 1990, 173 S., Fr. 42.50.

Otto Jaag, der 1978 verstorbene ehemalige Direktor der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz und Professor für Hydrobiologie an der ETHZ, besuchte 1938 anlässlich eines Forschungsaufenthaltes in Java (Indonesien) die nördlich Timor gelegene kleine Insel Alor, ein damals von Weissen noch wenig berührtes Gebiet, wo er vor allem Pflanzen sammelte. Infolge starker zeitlicher Beanspruchung als Assistent und Professor am Institut für spezielle Botanik der ETHZ und später als Direktor der EAWAG kam er bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1970 nicht dazu, seine Sammlungen auszuwerten und die Erkenntnisse seiner Reise zu veröffentlichen. Ab 1970 bis zu seinem acht Jahre später erfolgten Tode sichtete er seine Notizen und begann mit Begeisterung seine Eindrücke niederzuschreiben. Leider war es ihm nicht mehr vergönnt, die Arbeit zu vollenden. Elisabeth Jaag-Schenk, seine Gattin, hat nun in mühevoller Kleinarbeit und mit grossem Einfühlungsvermögen das kleine Werk fertiggestellt und veröffentlicht. Eine spannende und farbige Schilderung der denkwürdigen Reise, mit vielen Originalphotos illustriert, liegt nun vor. Der Wert der Schrift liegt weniger in den wissenschaftlichen Resultaten der Reise als im Festhalten eines Zeitdokumentes. Eindrücklich ruft sie uns die liebenswürdige Persönlichkeit von Otto Jaag in Erinnerung. Allen, die ihn gekannt und geschätzt haben, aber auch jenen, die sich an Erlebnisberichten aus fremden Ländern freuen, ist das Buch herzlich zu empfehlen.

E. Landolt

Carsten Niemitz (Hrsg.), Das Regenwaldbuch. – Berlin und Hamburg, Verlag Paul Parey, 1991, 224 S. DM 29.80.

Noch sind es kaum zweihundert Jahre, seit die wissenschaftliche Erforschung der grossen tropischen Regenwaldgebiete einsetzte, erst vor etwa einem Jahrhundert begann die industrielle Nutzung der Tropenwälder in grösserem Massstab – und schon müssen wir uns mit ihrer anthropogen bedingten Vernichtung auseinan-

dersetzen, einem Genozid an der Pflanzenwelt, das der Fähigkeit des Menschen als Bewahrer der eigenen Existenzgrundlagen ein denkbar schlechtes Zeugnis ausstellt!

Das vom Berliner Humanbiologen Carsten Niemitz herausgegebene, mit einem Geleitwort von Willy Brandt, dem Vorsitzenden der Nord-Süd-Kommission, versehene «Regenwaldbuch» ist kein kühl-sachlich geschriebenes Kompendium, kein unterhaltsamer Führer für Safari-Touristen, sondern eine Sammlung von sechzehn engagiert geschriebenen, zum Teil kontroversen Beiträgen von Naturwissenschaftern, Soziologen, Wirtschaftsvertretern und Politikern. Polemische Töne fehlen jedoch weitgehend, die verschiedenen Verfasser kämpfen durch Argumentation für ihre Ansichten. Allerdings fehlt es auch nicht an grosszügigen Allgemeinrezepten und Schlagwortwiedergaben!

Die grosse Verletzlichkeit der ökologischen Beziehungssysteme im tropischen Regenwald liegt der ganzen Problematik zugrunde und wird im einführenden Kapitel von Joseph H. Reichholf nachgewiesen und erklärt. Sie wird von keinem übrigen der Mitarbeiter in Frage gestellt. Ebenso herrscht Einigkeit bezüglich des Artenreichtums in Flora und Fauna dieser Wälder und bezüglich der Wünschbarkeit der Erhaltung dieser genetischen Vielfalt. Schliesslich bleibt die Tatsache massiver Verluste an solchen Biotopen unbestritten, und die Schuld des Menschen daran wird anerkannt.

Die Gewichtung, die den einzelnen menschlichen Eingriffen bei der Waldzerstörung beigemessen wird, fällt je nach Standpunkt der Verfasser der Beiträge unterschiedlich aus. Entsprechend variieren auch die Rezepte für den Schutz der noch vorhandenen Areale. Erschwerend kommt hinzu, dass die praktische Verwirklichung gutgemeinter Pläne infolge fehlender Motivation, gegensätzlicher Interessen, wirtschaftlicher Notlagen oder schierer Ignoranz verantwortlicher und ausführender Stellen oft im argen liegt. Hartmut Kenneweg berichtet unter dem Titel «Regenwaldnutzung zwischen Restriktionen und Raubbau» über zwiespältige Erfahrungen aus Indonesien, wo zum Schutz noch bestehender Waldflächen auf dicht besiedelten Inseln massive Umsiedlungsprojekte die Bevölkerung auf andere Inseln verteilen, mit entsprechenden Waldrodungen in den neuen Siedlungsgebieten. Holznutzung für Exportzwecke ist seiner Ansicht nach nicht die Hauptursache für die Waldzerstörung in Indonesien. Diese Auffassung teilt Carsten Niemitz in seinem Aufsatz über die tropischen Regenwälder und die Problematik der Dritten Welt. Trotzdem plädiert er für die Einschränkung des Verbrauchs von Tropenhölzern in den Industrieländern, vor allem angesichts der oft unsinnigen Verschwendung wertvoller Materialien für minderwertige Produkte. Eberhard F. Bruenig vom Hamburger Institut für Weltforstwirtschaft und Karl Danzer, ein Unternehmer der Holzwirtschaft, sprechen sich ebenfalls für eine sinnvolle Nutzung der Tropenwälder aus, betonen aber, wie wichtig Handhabung, Sorgfalt und Verantwortungsbewusstsein bei der Planung und Ausführung der Arbeiten sind. Zu Recht weist insbesondere Bruenig darauf hin, dass manche «Urwälder» in Wirklichkeit Sekundärwälder sind, in denen der Mensch schon lange aktiv war. Barbara Unmüssig setzt sich kritisch mit dem «Tropical Forestry Action Plan» der Weltbank und anderer internationaler Organisationen auseinander, der höchstens kurzfristig zur Verminderung des Schuldenzuwachses in Entwicklungsländern beitragen kann, dafür aber die ländliche Bevölkerung und die Ureinwohner zu Verlierern macht. Zu einem völligen Verzicht auf die Verwendung von Tropenhölzern im Sinne eines Boykotts ruft schliesslich Gerriet Harms vom ökologisch orientierten Holzhandel in Oldenburg auf!

Im Zusammenhang mit Industrialisierung und Weltwirtschaft, aber auch mit der Zunahme der Weltbevölkerung tragen Rodungen zur Gewinnung von Acker- und Weideland (neuerdings in grossem Massstab für industrielle Fleischproduktion – «Fast-Food»-Ketten!), Prospektion und Ausbeutung von Bodenschätzen und Deckung des Energiebedarfs durch hydroelektrische Grossprojekte zum Untergang der Regenwälder bei. Clarita Müller-Plantenberg wie auch Luis Carlos B. Molion weisen in ihren Beiträgen am Beispiel der Erschliessung Amazoniens detailliert auf diese Aktivitäten und ihre unbeabsichtigten weiteren Folgen hin. Mehr als die Holznutzung gefährden Landspekulation, Belastung der Gewässer durch Ballast- und Giftstoffe, Zwang zur Umsiedlung das Tropenwald-Ökosystem als Ganzes (Pflanzenwelt, Fauna und eingesessene Bevölkerung). Beide Autoren fordern ein Umdenken hinsichtlich der Landnutzung im Sinne nachhaltiger, ganzheitlicher Produktionsweisen. Molion weist auch auf die Beeinflussung des Weltkli-

mas durch Brandrodung und Verlust von assimilierender Biomasse hin. Mit den Chancen und Gefahren des Vorkommens von Bodenschätzen und ihrer Ausbeutung befasst sich der Geologe Jörg Hettler anhand von Erfahrungen in Papua-Neuguinea und im Amazonasgebiet. Wie im Beitrag von Danzer über die Holznutzung gilt auch hier, dass ein Abbau theoretisch ohne schwerwiegende Gefährdung des fragilen Ökosystems Regenwald möglich wäre, wenn die Bereitschaft zum Einsatz sinnvoller planerischer und technischer Mittel und zum Verzicht auf zerstörerische Weiterverarbeitungsmethoden vorhanden wäre. Michael Karus erwähnt in seinem Artikel über die Energieversorgung der Dritten Welt alternative Möglichkeiten unter Verzicht auf Wasserkraftwerke grossen Ausmasses. Gerade im Bereich der Solarkraftwerke darf aber das Dilemma der Umweltverschmutzung bei der Fabrikation des notwendigen Flachglases nicht vergessen werden!

Mit der Bedeutung des Regenwaldes für die ursprüngliche Bevölkerung beschäftigen sich Markus Brose und Peter E. Stüben. Der erste Autor schildert die Praktiken extensiven, schonenden Landbaus im Waldgebiet Amazoniens und regt an, das Wissen der Indianer in die sinnvolle Nutzung der Vegetation einzubringen und so ihr Überleben ohne zunehmende Abhängigkeit von äusserer Hilfe zu sichern. Stübens Aufsatz endlich fasst in einer einzigen grossen Anklage zusammen, was unter dem Schlagwort wirtschaftlicher Entwicklung durch den Egoismus der Macht und die Einfalt ihrer Helfer an den Regenwäldern und ihren Bewohnern gesündigt wurde und immer noch wird! Wie ein Echo darauf aus dem Wald selbst klingen Aufruf und Bericht von Davi Kopenawa Yanomami von jenem Indianerstamm, der durch das Eindringen und die Aktivitäten der Goldwäscher vom Aussterben bedroht ist.

Die letzten Kapitel des Regenwaldbuchs stammen von Bernd Schmidbauer und Liesel Hartenstein, zwei Mitgliedern des Deutschen Bundestags. Sie setzen sich mit der Umwelt- und Entwicklungspolitik der Bundesrepublik Deutschland bzw. mit den Möglichkeiten einer internationalen Partnerschaft zur Erhaltung der tropischen Regenwälder auseinander. Eine Adressenliste und eine Literaturübersicht zuhanden interessierter Leser sowie biographische Hinweise zu den verschiedenen Autoren ergänzen den Band.

Wer wie der Rezensent vor Jahrzehnten als Botaniker mit Tropenwäldern Bekanntschaft gemacht hat, ist bedrückt von den wie ein Automatismus ablaufenden zerstörerischen Eingriffen, die sich überall abspielen. Der Mythos des Wirtschaftswachstums und seiner Priorität ist allmächtig. Noch bedrückender aber ist die Gleichgültigkeit, die weitestgehend auf den eigenen Interessenkreis beschränkte Sicht der Bevölkerung der Industrieländer. Das resultierende Gefühl der Hilflosigkeit, der absoluten Ohnmacht wird dadurch verstärkt, dass es der Mehrzahl der Politiker in Nord *und* Süd an Sachverstand, der Mehrzahl der Biologen und Ökologen aber an politischer Durchsetzungskraft fehlt und dass beide, Politiker und Wissenschafter, im Spinnennetz der sogenannten wirtschaftlichen Sachzwänge hängen bleiben!

H. Hürlimann

Czihak, G., H. Langer, H. Ziegler, «BIOLOGIE, ein Lehrbuch», 995 Seiten, 1350 Abbildungen, 4., neuüberarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1989, DM 98.–.

Während meines Biologiestudiums habe ich mit der ersten Auflage der «Springer-Biologie» zu arbeiten begonnen und diese in den vergangenen Jahren immer wieder zu Rate gezogen. Nun liegt das Werk bereits in der vierten Auflage vor.

Einige Veränderungen, die das Buch seit der dritten Auflage erfahren hat, sind sofort ersichtlich: Der Umschlag wurde graphisch neu und ansprechender gestaltet, wobei die Grundfarbe Grün geblieben ist. Zudem ist der Einband, vermutlich aus Kostengründen, nicht mehr kartoniert, sondern broschiert, was meiner Meinung nach das Arbeiten mit dem schwergewichtigen Buch nicht gerade erleichtert. Weil es den Anspruch erhebt, ein Lehrbuch zu sein, hätte ich aus arbeitstechnischen und didaktischen Gründen lieber zwei dünnere Bücher in Hochformat (mit entsprechender Stoffaufteilung) als das vorliegende, fast quadratische Werk.

Das Konzept wurde beibehalten, das heisst, dass die Aufteilung in elf Kapitel geblieben ist und im Kapitel elf die systematischen Tafeln nun neu eingeheftet sind, während sie vorher vergrössert, als separate Faltblätter, dem Buch beigelegt waren. Auch wurde das bewährte Prinzip beibehalten, wonach in erster Linie biologische Gemeinsamkeiten betont und die traditionellen Teilgebiete weniger stark voneinan-

der getrennt werden. In einigen Fällen jedoch sind in kurzen Kapiteln tierische und pflanzliche Aspekte einander gegenübergestellt und Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiedlichkeiten überblicksmässig erarbeitet. Im Abschnitt über Hormone (Kapitel 6) ist dies z.B. auf sehr anschauliche, präzise Art erfolgt. Die Behandlung der Phytohormone, im speziellen, ist angemessen in Umfang und klar in der Darstellung. Allerdings vermisse ich hier ein wenig die Aktualität, denn ELISA-Tests und monoklonale Antikörper werden schon seit einigen Jahren routinemässig zum Nachweis von Auxinen, Gibberellinen und Cytokininen eingesetzt und haben sich in dieser eher schwierigen Analytik-Sparte sehr bewährt.

Text und die meist hervorragenden Abbildungen (zweifarbige Zeichnungen, Schemata und Fotos) blieben auch weiterhin voneinander getrennt; hier sei der Wunsch angebracht, den Text in einer späteren Auflage zweispaltig zu führen, falls das Format nicht geändert würde; das Auffinden von Stichworten würde damit erheblich erleichtert werden.

Rein summarisch gesehen wurde der Umfang des Buches um 50 Seiten, 115 Abbildungen und rund 3000 Stichworte erweitert. Heute aktuelle Begriffe wie Ozon, AIDS, Gentechnologie und -manipulation sind zwar neu ins Sachverzeichnis aufgenommen, im Text jedoch etwas stiefmütterlich behandelt. Schlagworte wie Treibhauseffekt und Klimaveränderung müssten ebenfalls aufgenommen werden.

Die grössten Veränderungen bei der Überarbeitung des Buches haben die Kapitel 1, 2 und 4 (Zellbiologie, Genetik, Entwicklung) erfahren; sie sind der stürmischen Entwicklung in diesen ineinandergreifenden Sachgebieten entsprechend angepasst und aktualisiert worden. Das bedeutet, dass grosse Teile der Kapitel umgeschrieben wurden und einzelne Abschnitte neu dazukamen.

Im neuen kurzen Abschnitt über Gentechnologie und -manipulation (Kapitel 2) fände ich es wichtig, dass nicht nur die Unwahrscheinlichkeit der Methodenanwendung beim Menschen (wegen zu langer Generationszeit) betont wird, sondern auch auf die Gefahr von Unfällen mit genmanipulierten Mikroorganismen aufmerksam gemacht wird. Die Auswirkung solcher Pannen sind wegen der hohen Vermehrungsrate dieser Lebewesen nämlich nur schwer abzuschätzen.

Die Kapitel 5, 6, 8, 11 (Struktur und Funktion, Strukturelle und funktionelle Integra Ökologie, Systematik) erfuhren kleinere Ve derungen, wie Kürzungen, Ergänzungen minime Überarbeitungen. Unverändert ble die Kapitel 3, 7, 9, 10 (Fortpflanzung, Ve ten, Biogeographie, Evolution).

Das Buch erfüllt seine Aufgabe, Wiss grundlage für jene Teilgebiete der Biologi sein, für die sich die Studierenden nicht spe lisieren, bestens. Zudem ist es auch für jene sich vertieft in ein Sachgebiet einzuarbe haben, ein sehr guter Ausgangspunkt.

Das Buch ist vorzüglich geeignet, als S dardwerk in jedem Büchergestell naturwis schaftlich gebildeter Personen zu stehen!

L. Bergamin St

Hinweise für Autoren

1 Manuskript

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle . . .).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 Bilder

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild . . .) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich
Jahrgang 136, Heft 2, Juni 1991

Inhalt

Beiträge

Buchbesprechungen

Preis Fr. 15.–

5

Heft 3
Jahrgang 136
September 1991

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

NGZ Naturforschende Gesellschaft in Zürich

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85*, zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 78.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die Hinweise für Autoren auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. em. Dr. H.H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich)*. – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Druck und Verlag:

Auflage: 2230; Tauschexemplare 546.

:hdruck, auch auszugsweise, nur mit Quellenangabe gestattet.

N 0042–5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/3: 137–149

Schutz der natürlichen Ressourcen – Das Beispiel Boden

Hans Sticher, ETH Zürich

Bodenschutz umfasst alle direkten und indirekten Massnahmen, welche dazu beitragen, die Funktionen des Bodens in ihrer Gesamtheit und in ausgewogenem Verhältnis auf lange Frist nachhaltig zu bewahren. Im Sinne der Erhaltung des Bodens als Lebensraum und Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen geht es also darum, ausreichende Flächen für die Primärproduktion freizuhalten, die Fruchtbarkeit dieser Flächen langfristig sicherzustellen, ökologische Ausgleichsflächen auszuscheiden und den Landverbrauch so weit wie möglich zu begrenzen. Ausgehend von allgemeinen Überlegungen zur Gefährdung der Bodenqualität durch den Menschen wird die Bodenschutzpolitik der Schweiz vorgestellt. Getroffene Massnahmen werden kritisch gewürdigt, und vereinzelt werden notwendige Ergänzungen vorgeschlagen.

Conservation of our Natural Resources – the Soil Case

Soil protection includes all direct and indirect measures which support the conservation of the different soil functions in a balanced proportion. In order to preserve the soil as the basis of life and as an adequate habitat of mankind, animals and plants, it is essential to keep a sufficient area for primary production, to secure fertility and productivity of the soil at long sight, to maintain adequate nature protection reserves and to limit land consumption.
Following general considerations about the endangering of soil quality by human activities, the soil protection policy of Switzerland is presented, present regulations are critically reviewed and some supplementary measures are suggested.

1 Einleitung

Die Kontamination der Umwelt mit toxischen Substanzen macht sich in der Atmosphäre und Hydrosphäre rasch durch eine fühlbare Verschlechterung von Luft- und Wasserqualität bemerkbar. Im Gegensatz dazu reagiert die Pedosphäre als wirksames Filter- und Puffersystem gegenüber Kontaminationen eher langsam. Es erstaunt deshalb nicht, dass der Boden bis in die jüngste Zeit hinein als willkommene Senke galt, in die man praktisch alles, was man zu entsorgen hatte, getrost und scheinbar ohne Folgen vergraben durfte. Dass man sich der Gefahr, welche diesem Gebahren innewohnte, nicht eher bewusst wurde, hat wohl zwei Gründe: Zum einen wird der Boden als «chemisch-biologischer Reaktor» mit vielen eingebrachten Stoffen durch Abbau und Mineralisierung rasch fertig. Zum anderen sind die Erträge in der Landwirtschaft in den letzten Jahrzehnten durch Nutzungsintensivierung dermassen in die Höhe geschnellt, dass allfällige Schäden weitgehend überdeckt wurden. Die Wende kam Anfang der siebziger Jahre, als erste Meldungen über erhöhte Schwermetallgehalte in Böden von Ballungsgebieten, entlang von stark befahrenen Verkehrsachsen und von klärschlammgedüngten Flächen veröffentlicht wurden. Die Argumentation war zunächst linear: verschmutzter Boden – kontaminierte Nahrung – Gefährdung der Gesundheit. Allmählich setzte sich aber die Einsicht durch, dass der

Boden als solcher, mit der Vielfalt seiner verschiedenen Funktionen im terrestrischen Ökosystem, bedroht sein könnte, zumal neben der zunehmenden Verschmutzung auch in unserem Lande immer deutlicher die Folgen bodenschädigender Prozesse wie Erosion, Strukturdegradation und Verdichtung zutage traten. Die Beanspruchung von grossen Flächen für die immense Bautätigkeit führte ausserdem zu Verdrängungseffekten und Intensivierungsmassnahmen, was den Druck auf den Boden im weitesten Sinne zusätzlich erhöhte. Verbunden damit war die Zerschneidung und Ausmerzung von naturnahen Ausgleichsflächen und in der Folge davon das Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten.

Mit steigender Einsicht in die komplexen Zusammenhänge zwischen technisch-ökonomischem Fortschritt und Bodenqualität erwuchs die Erkenntnis der Notwendigkeit eines umfassenden, integralen Bodenschutzes.

Ausgehend von den mannigfaltigen, miteinander vernetzten Funktionen der Pedosphäre wird in den folgenden Ausführungen aufgezeigt, wo die heutige Gefährdung des Bodens liegt, welche Auswirkungen allenfalls zu befürchten sind und welche Massnahmen zu treffen sind, um den anstehenden Gefahren wirksam zu begegnen. Im Bewusstsein, dass die Probleme auf globaler Basis teilweise anders geartet sind – Erosion, Versalzung und Wüstenbildung stehen weltweit im Vordergrund –, beschränkt sich der vorliegende Aufsatz im Sinne eines Fallbeispiels auf den hochindustrialisierten westeuropäischen Raum und, was die konkreten Massnahmen anbelangt, auf unser eigenes Land.

2 Der Boden und seine Funktionen

2.1 Der Boden als Teil des terrestrischen Ökosystems

Der Boden ist der schmale Grenzbereich der Erdoberfläche, in dem sich Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre überlagern. Der Boden stellt das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen dar, welches in der Lage ist, höheren Pflanzen als Standort zu dienen. Er bildet damit die Grundlage für das Leben von Mensch und Tier.

Unter dem Einfluss der Umweltfaktoren Muttergestein, Klima, Relief und Lebewesen (Flora, Fauna, Mikroorganismen) laufen an der Erdoberfläche komplexe Vorgänge ab, welche im Laufe von langen Zeiträumen zu einer breiten Palette verschiedenster Bodentypen führen:

- Das Muttergestein wird physikalisch, chemisch und biologisch zerkleinert, abgebaut und umgewandelt; es verwittert.
- Abgestorbene Lebewesen pflanzlicher und tierischer Herkunft werden von Bodentieren und Mikroorganismen zersetzt, umgewandelt und dem Boden einverleibt; sie werden zu Humus.
- Ausgangsstoffe und Produkte der Verwitterung und Humifizierung werden in und auf dem Boden, in Lösung oder als Partikel, verlagert.

- Im Kontakt miteinander werden die Bodenbestandteile durch Kittstoffe, welche teilweise biologischen Ursprungs sind, miteinander verbunden; im Nahbereich bildet sich eine neue Anordnung, ein bodeneigenes Gefüge (Krümel, Bröckel).

Durch das Zusammenwirken dieser Bodenbildungsprozesse entsteht eine charakteristische Abfolge von mehr oder weniger scharf gegeneinander abgegrenzten Schichten, welche man als Bodenhorizonte bezeichnet. Je nach Vorhandensein, Mächtigkeit und Abfolge solcher Horizonte unterscheidet man verschiedene Bodentypen, welche zu Bodenklassen und Bodenverbänden zusammengefasst werden. So findet man im Jura auf Kalkstein die *Rendzina*, einen Bodentyp, bei welchem wenige Dezimeter humoser, neutraler Oberboden direkt auf dem Kalkschutt oder Kalkfels aufliegt. Auf den Moränen und Schottern des Mittellandes herrschen *Braunerden* und *Parabraunerden* vor, bei welchen unter dem schwach sauren, humosen Oberboden eine bis 1 Meter mächtige rostfarbige Verwitterungsschicht folgt. Und schliesslich finden wir im Alpenraum, meist unter Nadelwäldern, das *Podzol* mit einer mehr oder minder mächtigen Auflage von stark saurem Rohhumus. Die grossen Unterschiede der physikalisch-chemischen Eigenschaften, wie sie aus der vorstehenden Kurzbeschreibung hervorgehen, führen zu einer unterschiedlichen standörtlichen Gefährdungsempfindlichkeit, welche es bei der Evaluation von präventiven Bodenschutzmassnahmen zu berücksichtigen gilt (s. u.).

Die Umweltfaktoren, welche die Entwicklung des Bodens beeinflussen, bestimmen auch die standörtliche Ausbreitung von Flora und Fauna. Boden, Flora und Fauna stehen damit in einer engen Beziehung zueinander; sie bilden ein Ökosystem. Dieses strebt einem Klimaxstadium entgegen, in welchem die Kompartimente des Systems untereinander und das System als Ganzes mit den Umweltfaktoren im Gleichgewicht stehen.

Wo der Mensch in das System eingreift, erfolgt eine Störung des Gleichgewichtszustandes, wobei der Ausdruck Störung hier zunächst nicht in wertendem Sinne zu verstehen ist. Mit seinen Eingriffen (Rodung, Ackerbau, Düngung, Bewässerung, Überbauung usw.) schafft der Mensch neue, anthropogene Ökosysteme (Kulturlandschaften mit Kulturböden), welche mit der Umgebung nicht mehr im Gleichgewicht stehen. Zu deren Erhaltung ist eine dauernde Bearbeitung (Zufuhr von Energie) notwendig.

2.2 Funktionen des Bodens

Der Boden erfüllt im Kreislauf der Natur und im Dienste des Menschen vielfältige Funktionen, welche sich entsprechend ihrem Bezug zum Menschen in drei Gruppen einteilen lassen (Tab. 1).

Die verschiedenen Funktionen des Bodens überlagern sich gegenseitig in unterschiedlichem Masse. So kann ein Standort gleichzeitig alle ökologischen Funktionen wahrnehmen. Wird er jedoch überbaut, so werden diese Funktionen hinfällig, der Boden erfüllt aber weiterhin seine Funktion als Sachwert, wenn

Boden als solcher, mit der Vielfalt seiner verschiedenen Funktionen im terrestrischen Ökosystem, bedroht sein könnte, zumal neben der zunehmenden Verschmutzung auch in unserem Lande immer deutlicher die Folgen bodenschädigender Prozesse wie Erosion, Strukturdegradation und Verdichtung zutage traten. Die Beanspruchung von grossen Flächen für die immense Bautätigkeit führte ausserdem zu Verdrängungseffekten und Intensivierungsmassnahmen, was den Druck auf den Boden im weitesten Sinne zusätzlich erhöhte. Verbunden damit war die Zerschneidung und Ausmerzung von naturnahen Ausgleichsflächen und in der Folge davon das Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten.

Mit steigender Einsicht in die komplexen Zusammenhänge zwischen technisch-ökonomischem Fortschritt und Bodenqualität erwuchs die Erkenntnis der Notwendigkeit eines umfassenden, integralen Bodenschutzes.

Ausgehend von den mannigfaltigen, miteinander vernetzten Funktionen der Pedosphäre wird in den folgenden Ausführungen aufgezeigt, wo die heutige Gefährdung des Bodens liegt, welche Auswirkungen allenfalls zu befürchten sind und welche Massnahmen zu treffen sind, um den anstehenden Gefahren wirksam zu begegnen. Im Bewusstsein, dass die Probleme auf globaler Basis teilweise anders geartet sind – Erosion, Versalzung und Wüstenbildung stehen weltweit im Vordergrund –, beschränkt sich der vorliegende Aufsatz im Sinne eines Fallbeispiels auf den hochindustrialisierten westeuropäischen Raum und, was die konkreten Massnahmen anbelangt, auf unser eigenes Land.

2 Der Boden und seine Funktionen

2.1 Der Boden als Teil des terrestrischen Ökosystems

Der Boden ist der schmale Grenzbereich der Erdoberfläche, in dem sich Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre überlagern. Der Boden stellt das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen dar, welches in der Lage ist, höheren Pflanzen als Standort zu dienen. Er bildet damit die Grundlage für das Leben von Mensch und Tier.

Unter dem Einfluss der Umweltfaktoren Muttergestein, Klima, Relief und Lebewesen (Flora, Fauna, Mikroorganismen) laufen an der Erdoberfläche komplexe Vorgänge ab, welche im Laufe von langen Zeiträumen zu einer breiten Palette verschiedenster Bodentypen führen:

- Das Muttergestein wird physikalisch, chemisch und biologisch zerkleinert, abgebaut und umgewandelt; es verwittert.
- Abgestorbene Lebewesen pflanzlicher und tierischer Herkunft werden von Bodentieren und Mikroorganismen zersetzt, umgewandelt und dem Boden einverleibt; sie werden zu Humus.
- Ausgangsstoffe und Produkte der Verwitterung und Humifizierung werden in und auf dem Boden, in Lösung oder als Partikel, verlagert.

– Im Kontakt miteinander werden die Bodenbestandteile durch Kittstoffe, welche teilweise biologischen Ursprungs sind, miteinander verbunden; im Nahbereich bildet sich eine neue Anordnung, ein bodeneigenes Gefüge (Krümel, Bröckel).

Durch das Zusammenwirken dieser Bodenbildungsprozesse entsteht eine charakteristische Abfolge von mehr oder weniger scharf gegeneinander abgegrenzten Schichten, welche man als Bodenhorizonte bezeichnet. Je nach Vorhandensein, Mächtigkeit und Abfolge solcher Horizonte unterscheidet man verschiedene Bodentypen, welche zu Bodenklassen und Bodenverbänden zusammengefasst werden. So findet man im Jura auf Kalkstein die *Rendzina*, einen Bodentyp, bei welchem wenige Dezimeter humoser, neutraler Oberboden direkt auf dem Kalkschutt oder Kalkfels aufliegt. Auf den Moränen und Schottern des Mittellandes herrschen *Braunerden* und *Parabraunerden* vor, bei welchen unter dem schwach sauren, humosen Oberboden eine bis 1 Meter mächtige rostfarbige Verwitterungsschicht folgt. Und schliesslich finden wir im Alpenraum, meist unter Nadelwäldern, das *Podzol* mit einer mehr oder minder mächtigen Auflage von stark saurem Rohhumus. Die grossen Unterschiede der physikalisch-chemischen Eigenschaften, wie sie aus der vorstehenden Kurzbeschreibung hervorgehen, führen zu einer unterschiedlichen standörtlichen Gefährdungsempfindlichkeit, welche es bei der Evaluation von präventiven Bodenschutzmassnahmen zu berücksichtigen gilt (s. u.).

Die Umweltfaktoren, welche die Entwicklung des Bodens beeinflussen, bestimmen auch die standörtliche Ausbreitung von Flora und Fauna. Boden, Flora und Fauna stehen damit in einer engen Beziehung zueinander; sie bilden ein Ökosystem. Dieses strebt einem Klimaxstadium entgegen, in welchem die Kompartimente des Systems untereinander und das System als Ganzes mit den Umweltfaktoren im Gleichgewicht stehen.

Wo der Mensch in das System eingreift, erfolgt eine Störung des Gleichgewichtszustandes, wobei der Ausdruck Störung hier zunächst nicht in wertendem Sinne zu verstehen ist. Mit seinen Eingriffen (Rodung, Ackerbau, Düngung, Bewässerung, Überbauung usw.) schafft der Mensch neue, anthropogene Ökosysteme (Kulturlandschaften mit Kulturböden), welche mit der Umgebung nicht mehr im Gleichgewicht stehen. Zu deren Erhaltung ist eine dauernde Bearbeitung (Zufuhr von Energie) notwendig.

2.2 Funktionen des Bodens

Der Boden erfüllt im Kreislauf der Natur und im Dienste des Menschen vielfältige Funktionen, welche sich entsprechend ihrem Bezug zum Menschen in drei Gruppen einteilen lassen (Tab. 1).

Die verschiedenen Funktionen des Bodens überlagern sich gegenseitig in unterschiedlichem Masse. So kann ein Standort gleichzeitig alle ökologischen Funktionen wahrnehmen. Wird er jedoch überbaut, so werden diese Funktionen hinfällig, der Boden erfüllt aber weiterhin seine Funktion als Sachwert, wenn

Tabelle 1 Die verschiedenen Funktionen des Bodens

Table 1 The different functions of the soil

Ökologische Funktionen	Sozioökonomische Funktionen	Immaterielle Funktionen
Der Boden ist:	Der Boden dient dem Menschen als:	Der Boden ist:
Lebensraum für eine Vielzahl von Organismen	Produktionsgrundlage für Nahrungs- und Futtermittel	prägendes Landschaftselement und trägt als solches zum Erlebnis- und Erholungswert der Landschaft bei
Lebensgrundlage für Pflanzen, Tiere und Menschen	Produktionsgrundlage für pflanzliche Rohstoffe	ein Archiv der Natur- und Kulturgeschichte
effizientes Filter-, Puffer- und Speichersystem	Fläche für Siedlung, Arbeit, Erholung und Verkehr	
biologisch-chemischer Reaktor	Lagerstätte für Bodenschätze und Energiequellen	
	Lagerstätte für Abfälle	
	Sachwertanlage	

auch in geänderter Bewertung. Je nach räumlicher Lage und zeitbezogener Werthaltung der Gesellschaft tritt die eine oder andere Funktion in den Vordergrund und wird entsprechend höher geschätzt, es kommt zu einer Funktionsteilung: Es werden Landwirtschaftszonen, Bauzonen, Gewässerschutzzonen usw. ausgeschieden. Wenn sich der Mensch eine Funktion des Bodens dienstbar macht, spricht man von Bodennutzung. Steht genügend Fläche zur Verfügung, lassen sich die verschiedenen Nutzungsansprüche nebeneinander befriedigen. Wo jedoch der Boden knapp wird, kommt es zu Nutzungskonflikten und in der Folge zu partieller Übernutzung. Um den verschiedenen Ansprüchen an den Boden gerecht zu werden, sind deshalb Raumordnungsmassnahmen unabdingbar.

3 Kriterien der Bodenbewertung

3.1 Bodenqualität

Den Ausdruck Störung, der oben im Zusammenhang mit dem Eingriff des Menschen in das natürliche Ökosystem wertneutral verwendet wurde, empfin-
ɜn wir im Alltag mehrheitlich negativ, also als Gefährdung oder Bedrohung.
wäre allerdings wenig sinnvoll, einen ertragreichen Ackerboden, der über
erte sorgsam gepflegt wurde, wegen dieses Eingriffs schlechter einzu-
einen unbebauten Steppenboden. Wir stehen damit vor einem Dilem-
ler Sicht des naturbelassenen Ökosystems ist derjenige Boden gut, der
örtlichen Gegebenheiten im Einklang steht, mag er nun versauert,
alzt oder sonstwie geartet sein. Bodenschutz in diesem Sinne ist

Standortschutz und als solcher eine unabdingbare Komponente des Naturschutzes (z. B. Erhaltung von ökologischen Ausgleichsflächen). Aus der Sicht der Nutzung ist der fruchtbare Boden gut, und Bodenschutz in diesem Sinne bedeutet Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Um dem Begriff Fruchtbarkeit, an dem wir die Bodenqualität zu messen haben, im weitesten Sinne gerecht zu werden, seien hier zunächst einmal die drei Bedeutungsebenen des Ausdrucks Bodenqualität definiert.

Die erste Ebene bezieht sich auf die physische Beschaffenheit, auf messbare Grössen. Bezugseinheiten sind Meter, Kilogramm, Sekunde, Mol, Kelvin usw. Messgrössen für den Boden sind etwa der pH-Wert, die Dichte, die Porosität, der Stoffgehalt. Auf dieser Ebene von Gefährdung zu sprechen, wäre sinnlos. Das zutreffende Wort ist die Veränderung.

Die zweite Bedeutung von Qualität bezieht sich auf die Güte, auf Wertinhalte. Auch diese sind zunächst physikalisch erfassbar und messbar; die Messgrössen werden jedoch anhand einer festgelegten (allerdings nach Ort und Zeit wandelbaren) Skala bewertet. Veränderung bedeutet damit Wertzuwachs oder Wertverlust. Beispiele sind der Nährstoffgehalt, der Schadstoffgehalt und als Ganzes die Fruchtbarkeit.

Die dritte Bedeutung von Qualität spricht das subjektive Empfinden an, ist also eine Frage von Ästhetik und Emotion. Hier versagen physikalische Messgrössen, obwohl das Objekt der Empfindung durchaus gegenständlich erfassbar ist. Die Schönheit einer Landschaft, welche durch die (messbare) Beschaffenheit und Güte ihres Bodenverbandes geprägt ist, gehört hierzu, ebenso die Erhabenheit der Wüste oder die Melancholie des Moores.

3.2 Bodenfruchtbarkeit

Da mit einem umfassenden Bodenschutz nicht nur das Produktionspotential (d. h. die Ertragsfähigkeit) des Bodens auf lange Sicht bewahrt, sondern darüber hinaus auch die Gesundheit von Mensch und Tier sichergestellt werden soll, sind Bewertungskriterien so festzulegen, dass alle Aspekte des Schutzes gewährleistet sind. Als grundsätzliches Beurteilungskriterium kann eine Definition der Bodenfruchtbarkeit herangezogen werden, welche die erwähnten Aspekte vollumfänglich berücksichtigt und neben der langfristigen Aufrechterhaltung des Ertragspotentials auch eine konsumentenfreundliche Qualität der erzeugten Produkte anstrebt.

Gemäss Art. 2 der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo) ist ein Boden fruchtbar, wenn er

a. eine artenreiche und biologisch aktive Tier- und Pflanzenwelt, eine für seinen Standort typische Struktur und eine ungestörte Abbaufähigkeit besitzt;
b. das ungestörte Wachstum und die Entwicklung natürlicher und vom Menschen beeinflusster Pflanzen und Pflanzengesellschaften ermöglicht und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt;

c. gewährleistet, dass pflanzliche Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und für Menschen und Tiere gesundheitlich verträglich sind.

4 Bodengefährdung

4.1 Qualitative Schäden

Im Verlaufe ihrer Entwicklung sind Böden den unterschiedlichsten Naturgewalten ausgesetzt. Erosion, Versalzung, Versauerung, Verödung sind in ihrer Art natürliche Ereignisse, welche je nach Klimazone boden- und landschaftsprägend waren. Wenn heute von Bodengefährdung die Rede ist, so sind damit jene Gefahrenpotentiale gemeint, welche infolge der menschlichen Aktivität die ökologischen Funktionen des Bodens beeinträchtigen und seine Fruchtbarkeit und Regenerationskraft verringern. Qualitativen Schaden erleidet der Boden durch den Eintrag und die Anreicherung von toxischen Stoffen (Schwermetalle, Chlorkohlenwasserstoffe usw.) sowie unter der Veränderung chemischer, biologischer und physikalischer Eigenschaften (Verdichtung, Verschlämmung, Versauerung, Humusverlust, Strukturdegradation, Abnahme der biologischen Aktivität). Intensivnutzung und Übernutzung führen zur Zerschneidung und Ausmerzung von Freiräumen und verursachen in der Folge das Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten. Wie in jedem komplexen System kann ein Schaden an einem Teilsystem eine Kaskade von Folgereaktionen nach sich ziehen, welche im Endeffekt den Zustand des Bodens als Ganzes mitsamt seinen Funktionen beeinträchtigen. So kann der Einsatz schwerer Maschinen den Boden verdichten, die Porosität verringern, den Gasaustausch reduzieren, das Redoxpotential senken, das Pflanzenwachstum hemmen, den Ertrag verkleinern und als Konsequenz davon die Fruchtbarkeit und die Produktivität vermindern.

4.2 Quantitativer Bodenverlust

Überbauung und Versiegelung von Flächen führen zu quantitativen Bodenverlusten, die nur mit unverhältnismässigem Aufwand rückgängig gemacht werden können. In der Schweiz beträgt der Bodenverbrauch für Wohnen, Industrie, Gewerbe und Verkehr um 30 km^2 pro Jahr. Weltweit wird der jährliche Verlust an nutzbarem Boden auf 40 000 km^2 geschätzt, wozu allerdings neben der Überbauung nutzungsbedingte Prozesse wie Erosion, Versalzung und Wüstenbildung in erheblichem Masse beitragen.

5 Bodenschutz

Definition und Aufgaben des Bodenschutzes

er den Begriff Bodenschutz fassen wir alle direkten und indirekten Mass- ›n zusammen, welche dazu beitragen, die Funktionen des Bodens in ihrer

Gesamtheit und in ausgewogenem Verhältnis auf lange Frist nachhaltig zu bewahren. Voraussetzung dafür ist die haushälterische Nutzung des Bodens. Im Sinne der Erhaltung des Bodens als Lebensraum und Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen geht es also darum, ausreichende Flächen für die Primärproduktion freizuhalten, die Fruchtbarkeit dieser Flächen langfristig sicherzustellen, ökologische Ausgleichsflächen auszuscheiden und den Landverbrauch so weit wie möglich zu begrenzen.

Der direkte Bodenschutz umfasst Massnahmen am Boden selbst. Darunter fallen bodenschonende Bearbeitung, angepasste Düngung, integrierter Pflanzenbau, geeignete Fruchtfolge, aber auch Erosionsschutz, Wildbachverbauung und Hangstabilisierung. Der direkte Bodenschutz ist somit in erster Linie Sache des Landwirts, Försters und Kulturtechnikers; er liegt aber ebenso im Verantwortungsbereich von Genossenschaften, Korporationen und Gemeinden.

Der indirekte Bodenschutz umfasst alle Massnahmen, welche den Boden vor verschlechternden und zerstörenden Einflüssen von aussen bewahren. Die Verminderung von Schadstoffemissionen aus Industrieanlagen und Verkehrsmitteln gehört ebenso dazu wie (auf immaterieller Ebene) die Aufklärung und Ausbildung der Bevölkerung. Der indirekte Bodenschutz ist Sache der gesamten Gesellschaft.

5.2 Komponenten des Bodenschutzes

Zur Erreichung und Durchsetzung eines umfassenden Bodenschutzes sind Anstrengungen auf allen Ebenen notwendig, so auf der staatlich-gesetzgeberischen Ebene, auf der Ebene der industriellen Produktion und der Landwirtschaft und schliesslich auf der Ebene des einzelnen in der Gesellschaft.

Anstelle theoretischer Überlegungen, welche hier am Platze wären, soll im folgenden Abschnitt konkret aufgezeigt werden, was in unserem Lande zum Schutze des Bodens bislang unternommen wurde und wo allenfalls Ergänzungen bzw. Korrekturen anzubringen sind.

6 Bodenschutz in der Schweiz

6.1 Der Bodenschutz in Verfassung, Gesetzen und Verordnungen

1971 wurde mit Zustimmung des Volkes ein Umweltschutzartikel in der Bundesverfassung verankert, der insbesondere die Bekämpfung von Luftverunreinigungen und Lärm vorsah:

Art. 24^septies^

[1] Der Bund erlässt Vorschriften über den Schutz des Menschen und seiner natürlichen Umwelt gegen schädliche oder lästige Einwirkungen. Er bekämpft insbesondere die Luftverunreinigung und den Lärm.

[2] Der Vollzug der Vorschriften wird, soweit das Gesetz ihn nicht dem Bunde vorbehält, den Kantonen übertragen.

Erst 14 Jahre später (1. 1. 1985) wurde das auf diesem Artikel fussende Umweltschutzgesetz in Kraft gesetzt. Die den Boden betreffenden Artikel im Gesetzestext lauten:

Art. 14 Immissionsgrenzwerte für Luftverunreinigungen
Die Immissionsgrenzwerte für Luftverunreinigungen sind so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte
a. Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährden;
b. die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören;
c. Bauwerke nicht beschädigen;
d. die Fruchtbarkeit des Bodens, die Vegetation und die Gewässer nicht beeinträchtigen.

Art. 33 Richtwerte für Bodenbelastungen
Für die Beurteilung der Belastung des Bodens mit schädlichen und nicht oder nur schwer abbaubaren Stoffen kann der Bundesrat Richtwerte festlegen. Sie sind so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft und der Erfahrungen Belastungen unterhalb dieser Werte die Fruchtbarkeit des Bodens auch langfristig nicht beeinträchtigen.

Art. 34 Grundsatz
Der Schutz des Bodens gegen Belastungen durch Luftverunreinigungen, umweltgefährdende Stoffe und Abfälle wird in den Vorschriften nach den Artikeln 12, 14, 29 und 32 berücksichtigt.

Art. 35 Vorschriften der Kantone
Für Gebiete, in denen die Bodenfruchtbarkeit stark gefährdet oder bereits beeinträchtigt ist, legen die Kantone im Einvernehmen mit dem Bundesrat verschärfte Emissionsbegrenzungen fest oder beschränken die Verwendung von Stoffen im erforderlichen Mass.

Das Umweltschutzgesetz gibt dem Bundesrat die Möglichkeit, Verordnungen zum Schutze der Umwelt, also auch des Bodens, zu erlassen. Der Vollzug liegt aber bei den Kantonen.

Die bisher einzige, den Boden direkt betreffende Verordnung wurde auf den 1. 9. 1986 in Kraft gesetzt (VSBo). Obwohl darin als Schadstoffe namentlich Schwermetalle und chlorhaltige organische Verbindungen aufgeführt sind, enthält die Verordnung lediglich Richtwerte für die Schwermetalle und Fluor. Dass von der Festlegung von Richtwerten für chlorierte und andere organische Verbindungen (z. B. PCB, PAK) abgesehen wurde, lässt sich vertretbar begründen. So wird in den Erläuterungen zur VSBo dargelegt:

«Inzwischen hat sich aber die Meinung durchgesetzt, dass solche Stoffe gar nicht anhand von Richtwerten beurteilt werden dürfen, da allein schon ihr Vorhandensein im Boden auf eine mögliche Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit hinweist. Zulässige Gehalte darf es für diese Stoffe nicht geben» (BUS, 1987).

Von der Begründung her sind Richtwerte tiefer angesetzt als Grenzwerte. Während ein Grenzwert die apodiktische Forderung nach dem «Bis hierher und nicht weiter» beinhaltet, weist der Richtwert auf die Notwendigkeit von Massnahmen hin, bevor bereits Schädigungen wirksam sind. Wenn auch von der Idee her nicht ganz deckungsgleich, werden Richtwerte daher oft auch als Interventionswerte interpretiert.

Da der Boden im Kreislauf der Ökosphäre das trägste Kompartiment darstellt, das für viele Umweltgifte eine Senke bildet, kommt dem Schutz der

anderen Kompartimente (Wasser, Luft) im Hinblick auf einen wirksamen Bodenschutz eine mitentscheidende Bedeutung zu. Stoffe, die nicht in die Luft gelangen, belasten letztlich auch den Boden nicht. Aus diesem Grund wird der Bodenschutz indirekt auch durch Verordnungen, welche sich mit dem Wasser, der Luft und der Vegetation befassen, geregelt. Es sind dies:
- Klärschlammverordnung (8.4.81)
- Luftreinhalte-Verordnung (16.12.85)
- Verordnung über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (27.2.86)
- Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung, 9.6.86).

6.2 Bodenbeobachtungsnetze

Zur Erfassung der aktuellen und zukünftigen Belastung des Bodens mit Schadstoffen wurde 1984 das Nationale Beobachtungsnetz Boden (NABO) eingerichtet. Im Rahmen des NABO werden die 11 in der VSBo aufgeführten Elemente Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Tl, Zn und F an 100 über das ganze Land verteilten charakteristischen Standorten periodisch erfasst. Weitere Schadstoffe, wie z. B. polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) und polychlorierte Biphenyle (PCB), sollen dazukommen, sobald die notwendigen Grundlagen dazu vorhanden sind. Analoge Beobachtungsnetze werden zurzeit, in einem feineren Raster, von den Kantonen aufgebaut (KABO). Erste Resultate aus der gesamtschweizerischen Erhebung (H. Vogel et al., 1989) und aus dem Kanton Zürich (T. Wegelin, 1990) liegen vor (vgl. Tab. 2).

Tabelle 2 Schwermetallgehalte in ausgewählten Schweizerischen Böden (Totalgehalte* im Oberboden. Angaben in mg×kg^{-1}; in Klammern Richtwerte nach VSBo)

Table 2 Heavy metal content of selected Swiss soils (Total content* in the top soil, in mg×kg^{-1}. In parenthesis: guide levels according to VSBo, 1986)

	Mittelland (Swiss Plateau) Vogel et al. 1989 247 Proben		Kanton Zürich (Canton of Zurich) Wegelin 1990 425 Proben	
Element	Median	80%-Wertebereich	Median	80%-Wertebereich
Cd (0,8)	0,23	0,11 – 0,45	0,33	0,10 – 0,62
Cu (50)	23,3	9,0 – 61,0	21,7	9,0 – 42,6
Ni (50)	23,5	12,5 – 39,0	30,1	16,5 – 51,0
Pb (50)	23,8	13,5 – 40,5	32,1	19,4 – 54,2
Zn (200)	56,1	33,0 – 94,0	60,4	36,3 – 103,0
Hg (0,8)	n.b.	n.b.	0,14	0,08 – 0,34

* Extraktion mit 2 M HNO_3 bei 100°C (nach VSBo, 1986)

Ein Bodenbeobachtungsnetz vermag bei zweckmässiger Anlage einen flächenhaften Überblick über die aktuelle Schadstoffsituation im Boden einer Re-

Boden als solcher, mit der Vielfalt seiner verschiedenen Funktionen im terrestrischen Ökosystem, bedroht sein könnte, zumal neben der zunehmenden Verschmutzung auch in unserem Lande immer deutlicher die Folgen bodenschädigender Prozesse wie Erosion, Strukturdegradation und Verdichtung zutage traten. Die Beanspruchung von grossen Flächen für die immense Bautätigkeit führte ausserdem zu Verdrängungseffekten und Intensivierungsmassnahmen, was den Druck auf den Boden im weitesten Sinne zusätzlich erhöhte. Verbunden damit war die Zerschneidung und Ausmerzung von naturnahen Ausgleichsflächen und in der Folge davon das Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten.

Mit steigender Einsicht in die komplexen Zusammenhänge zwischen technisch-ökonomischem Fortschritt und Bodenqualität erwuchs die Erkenntnis der Notwendigkeit eines umfassenden, integralen Bodenschutzes.

Ausgehend von den mannigfaltigen, miteinander vernetzten Funktionen der Pedosphäre wird in den folgenden Ausführungen aufgezeigt, wo die heutige Gefährdung des Bodens liegt, welche Auswirkungen allenfalls zu befürchten sind und welche Massnahmen zu treffen sind, um den anstehenden Gefahren wirksam zu begegnen. Im Bewusstsein, dass die Probleme auf globaler Basis teilweise anders geartet sind – Erosion, Versalzung und Wüstenbildung stehen weltweit im Vordergrund –, beschränkt sich der vorliegende Aufsatz im Sinne eines Fallbeispiels auf den hochindustrialisierten westeuropäischen Raum und, was die konkreten Massnahmen anbelangt, auf unser eigenes Land.

2 Der Boden und seine Funktionen

2.1 Der Boden als Teil des terrestrischen Ökosystems

Der Boden ist der schmale Grenzbereich der Erdoberfläche, in dem sich Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre überlagern. Der Boden stellt das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen dar, welches in der Lage ist, höheren Pflanzen als Standort zu dienen. Er bildet damit die Grundlage für das Leben von Mensch und Tier.

Unter dem Einfluss der Umweltfaktoren Muttergestein, Klima, Relief und Lebewesen (Flora, Fauna, Mikroorganismen) laufen an der Erdoberfläche komplexe Vorgänge ab, welche im Laufe von langen Zeiträumen zu einer breiten Palette verschiedenster Bodentypen führen:

- Das Muttergestein wird physikalisch, chemisch und biologisch zerkleinert, abgebaut und umgewandelt; es verwittert.
- Abgestorbene Lebewesen pflanzlicher und tierischer Herkunft werden von Bodentieren und Mikroorganismen zersetzt, umgewandelt und dem Boden einverleibt; sie werden zu Humus.
- Ausgangsstoffe und Produkte der Verwitterung und Humifizierung werden in und auf dem Boden, in Lösung oder als Partikel, verlagert.

- Im Kontakt miteinander werden die Bodenbestandteile durch Kittstoffe, welche teilweise biologischen Ursprungs sind, miteinander verbunden; im Nahbereich bildet sich eine neue Anordnung, ein bodeneigenes Gefüge (Krümel, Bröckel).

Durch das Zusammenwirken dieser Bodenbildungsprozesse entsteht eine charakteristische Abfolge von mehr oder weniger scharf gegeneinander abgegrenzten Schichten, welche man als Bodenhorizonte bezeichnet. Je nach Vorhandensein, Mächtigkeit und Abfolge solcher Horizonte unterscheidet man verschiedene Bodentypen, welche zu Bodenklassen und Bodenverbänden zusammengefasst werden. So findet man im Jura auf Kalkstein die *Rendzina*, einen Bodentyp, bei welchem wenige Dezimeter humoser, neutraler Oberboden direkt auf dem Kalkschutt oder Kalkfels aufliegt. Auf den Moränen und Schottern des Mittellandes herrschen *Braunerden* und *Parabraunerden* vor, bei welchen unter dem schwach sauren, humosen Oberboden eine bis 1 Meter mächtige rostfarbige Verwitterungsschicht folgt. Und schliesslich finden wir im Alpenraum, meist unter Nadelwäldern, das *Podzol* mit einer mehr oder minder mächtigen Auflage von stark saurem Rohhumus. Die grossen Unterschiede der physikalisch-chemischen Eigenschaften, wie sie aus der vorstehenden Kurzbeschreibung hervorgehen, führen zu einer unterschiedlichen standörtlichen Gefährdungsempfindlichkeit, welche es bei der Evaluation von präventiven Bodenschutzmassnahmen zu berücksichtigen gilt (s. u.).

Die Umweltfaktoren, welche die Entwicklung des Bodens beeinflussen, bestimmen auch die standörtliche Ausbreitung von Flora und Fauna. Boden, Flora und Fauna stehen damit in einer engen Beziehung zueinander; sie bilden ein Ökosystem. Dieses strebt einem Klimaxstadium entgegen, in welchem die Kompartimente des Systems untereinander und das System als Ganzes mit den Umweltfaktoren im Gleichgewicht stehen.

Wo der Mensch in das System eingreift, erfolgt eine Störung des Gleichgewichtszustandes, wobei der Ausdruck Störung hier zunächst nicht in wertendem Sinne zu verstehen ist. Mit seinen Eingriffen (Rodung, Ackerbau, Düngung, Bewässerung, Überbauung usw.) schafft der Mensch neue, anthropogene Ökosysteme (Kulturlandschaften mit Kulturböden), welche mit der Umgebung nicht mehr im Gleichgewicht stehen. Zu deren Erhaltung ist eine dauernde Bearbeitung (Zufuhr von Energie) notwendig.

2.2 Funktionen des Bodens

Der Boden erfüllt im Kreislauf der Natur und im Dienste des Menschen vielfältige Funktionen, welche sich entsprechend ihrem Bezug zum Menschen in drei Gruppen einteilen lassen (Tab. 1).

Die verschiedenen Funktionen des Bodens überlagern sich gegenseitig in unterschiedlichem Masse. So kann ein Standort gleichzeitig alle ökologischen Funktionen wahrnehmen. Wird er jedoch überbaut, so werden diese Funktionen hinfällig, der Boden erfüllt aber weiterhin seine Funktion als Sachwert, wenn

liegt heute für die Schweiz ein guter Überblick über die Belastungssituation mit Bezug auf die in der VSBo aufgeführten Elemente vor (vgl. K. Meyer, 1991). Darnach weist der überwiegende Teil der Landesfläche Schwermetallgehalte auf, welche unterhalb des halben Richtwertes liegen. Vereinzelt finden sich jedoch in der Umgebung starker Emittenten hochbelastete Flächen, bei denen einzelne Elemente den Richtwert bis zu einem Mehrfachen überschreiten. Da die bestehenden Beobachtungsnetze mit ihrer Rasterstruktur solche Flächen (in der Mehrzahl Altlasten) eher zufällig entdecken, wird es Aufgabe der kommenden Jahre sein, gezielt darnach zu suchen und die verursachenden Emittenten zu ermitteln.

Über den zeitlichen Verlauf der Belastung vermögen die Beobachtungsnetze wegen der hohen räumlichen Variabilität kaum gesicherte Aussagen zu machen. Statt häufiger Messungen wird daher vorgeschlagen, in Zukunft die Beobachtungsnetze durch Stoffflusserhebungen zu ergänzen.

Über die Belastung des Bodens mit organischen Schadstoffen sind nur punktuelle Kenntnisse vorhanden. Wegen der Vielfalt der diesbezüglichen Stoffgruppen wird es nicht einfach sein, entsprechende Richtwerte festzulegen. Möglicherweise werden hier nicht chemische Gehaltsbestimmungen, sondern biologische Wirkungstests eingesetzt werden müssen.

Die Bodenfruchtbarkeit als integrale Grösse der Bodenqualität ist indessen nicht allein durch Schadstoffe gefährdet. Übernutzung, Strukturdestabilisierung, Verdichtung und Erosion sind Probleme, welche zurzeit vermutlich wesentlich höhere Schäden verursachen als die Kontamination (P. Weisskopf et al., 1988; T. Mosimann et al., 1990). Es ist daher erforderlich, die geltenden Rechtsgrundlagen im Hinblick auf einen alles umfassenden Bodenschutz im ganzheitlichen Sinne zu überprüfen.

Bodenschutz ist letztlich eine Sache des Umweltbewusstseins der Bevölkerung. Je grösser das Verständnis und die Sensibilisierung für die Notwendigkeit des Schutzes sind, desto höher ist die Akzeptanz für behördlich angeordnete Einschränkungen und Massnahmen. Fehlende Akzeptanz kann durch das Strafrecht nur unwesentlich verbessert werden. Erfolgreicher dürfte die Sozialkontrolle einer aufgeklärten und vom Sinn der Sache überzeugten Bevölkerung sein. Wenn wir den Boden als lebendigen Teil unserer Umwelt betrachten und seine lebenserhaltenden Funktionen achten, werden wir ihn schonungsvoll nutzen, aber niemals ausnutzen. Die zukünftigen Generationen haben das gleiche Recht auf Leben und damit auf Nutzung des Bodens wie die heutige Generation (H. Ruh et al., 1990).

8 Literatur

AG Bodenfruchtbarkeit (1990), Provisorische Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit, Liebefeld-Bern, 88 Seiten.

Baccini, P., Von Steiger, B., Piepke, G. (1988), Bodenbelastung durch Stoffflüsse aus der Anthroposphäre. In: K. E. Brassel und M. C. Rotach (Hrsg.): Die Nutzung des Bodens in der Schweiz, VDF Zürich, S.55–74.

BUS (Bundesamt für Umweltschutz), 1987, Erläuterungen zur Verordnung vom 9. Juni 1986 über Schadstoffe im Boden (VSBO). Bern, 17 Seiten.

Häberli, R., Lüscher, C., Praplan Chastonney, B., Wyss C. (1991). Boden- Los. Ein Vorschlag zur haushälterischen Nutzung des Bodens. Schlussbericht des NFP Boden, ca. 200 Seiten (erscheint Ende 1991).

Meyer, K. (1991), Die stoffliche Belastung der Böden in der Schweiz. Themenbericht NFP Boden. Liebefeld, ca. 200 Seiten.

Mosimann, T., Crole-Rees, A., Maillard, A., Neyrond, J.-A., Thöni, M., Musy, A., Rohr, W. (1990), Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland – Ausmass und Gegenmassnahmen. Bericht 51 des NFP Boden, Liebefeld-Bern, 262 Seiten.

NFP 22, (1985), Nationales Forschungsprogramm 22: Nutzung des Bodens in der Schweiz. Ausführungsplan; Schweiz. Nationalfonds, Bern.

Richner, B., Moos, F. (1989), Auswirkungen hoher Tierdichten auf die Qualität des Bodens. Bericht 41 des NFP Boden. Liebefeld-Bern, 101 Seiten.

Ruh, H., Brugger, F., Schenk, C. (1990), Ethik und Boden. Bericht 52 des NFP Boden. Liebefeld-Bern, 90 Seiten.

Vogel, H., Desaules, A., Häni, H. (1989), Schwermetallgehalte in den Böden der Schweiz. Bericht 40 des NFP Boden. Liebefeld-Bern, 118 Seiten.

Von Steiger, B., Baccini, P. (1990), Regionale Stoffbilanzierung von landwirtschaftlichen Böden mit messbarem Ein- und Austrag. Bericht 38 des NFP Boden, Liebefeld-Bern, 131 Seiten.

VSBo (1986), Verordnung über die Schadstoffe im Boden. Schweiz. Bundesrat, 9. Juni 1986.

Wegelin, T. (1990), Schadstoffbelastung des Bodens im Kanton Zürich. Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Zürich, 40 Seiten.

Weisskopf, P., Schwab, P., Jäggli, F., Kramer, E., Peyer K., Studer, R. (1988), Die Verdichtungsgefährdung Schweizerischer Ackerböden. Bericht 20 des NFP Boden. Liebefeld-Bern, 128 Seiten mit 2 Kartenblättern.

Widmer, H. (1990a), Bodenleben begreifen, schätzen und erhalten. Bericht 47 des NFP Boden. Liebefeld-Bern, 96 Seiten.

Widmer, H. (1990b), Der Boden lebt – erhalten wir ihn. Eine Unterrichtshilfe der WWF-Umwelterziehung. Zürich, 36 Seiten.

Prof. Dr. H. Sticher, Institut für terrestrische Oekologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

Buchbesprechung

Hans E. Laux: Geschützte und bedrohte Pflanzen. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH. Stuttgart, 1988, 132 Seiten mit 190 vierfarbigen Abbildungen, Preis DM 28.–.

Der Verfasser, Hans E. Laux, schreibt in seinem Vorwort, dass wir als Konsumenten eines ins Masslose gewachsenen Wohlstandes uns immer mehr an der einst reizvollen Naturlandschaft vergreifen und auf dem besten Wege sind, sie in eine menschenfeindliche Kultursteppe zu verwandeln. Er ruft uns zur Verpflichtung auf, Natur und Umwelt wieder bewusster zu sehen. Jeder von uns sei selbst Natur und deshalb aufgerufen, sich zu deren Schutz zu engagieren.

Eine wichtige Voraussetzung für diese edle Aufgabe ist beispielsweise die Kenntnis der wichtigsten geschützten und bedrohten Farn- und Blütenpflanzen, die im Hauptteil dieses reich und kompetent illustrierten Bandes in geeigneter Weise gefördert wird. Was dieses Werk von zahlreichen ähnlichen Publikationen abhebt, ist die am Anfang des Buches eingefügte Einleitung. In prägnanter und eindrucksvoller Kurzfassung werden die verhängnisvollen Folgen unserer zivilisatorischen Tätigkeit in unser Bewusstsein eingehämmert, nämlich:

- die Verarmung der vielfältigen Flora in Feld und Wald infolge Rationalisierungszwängen in deren Bewirtschaftung – mehr als ein Drittel der ursprünglichen Pflanzenarten sind bereits ausgerottet und durch Aussterben bedroht;
- die verheerenden Auswirkungen des Massentourismus in der Alpenwelt;
- die teilweise sinnlose Entwässerung von Feuchtgebieten und Kanalisierung von Gewässern und schliesslich Versiegelung der Landschaft durch masslose Ausdehnung der Siedlungsräume und daraus resultierender Verkehrslagen.

Dem Hauptteil vorangestellt ist eine für den interessierten Laien unerlässliche Erläuterung der wichtigsten botanischen Fachausdrücke. Prächtige, leider wegen des beschränkten Volumens des Werkes teilweise kleinformatige Fotos begleiten die Charakterisierung der Vertreter von 41 Pflanzenfamilien durch ihre Merkmale und Verbreitung. In fettgedruckten Fussnoten werden Hinweise auf den Grad der Gefährdung und die Schutzwürdigkeit vermittelt.

Im letzten Teil wird schliesslich auf die gesetzlichen Grundlagen eingegangen, die den Schutz wildlebender Pflanzen und Tiere ermöglichen. Die am Schlusse vor dem Register angeführte Rote Liste der Farn- und Blütenpflanzen in der Fassung von 1982 bildet eine wertvolle Ergänzung des Bildteiles und für die für Naturschutzfragen und Umweltpolitik verantwortlichen Behörden und Organe einen unentbehrlichen Leitfaden für ihre Tätigkeit.

Die Publikation von Hans E. Laux richtet sich zwar in erster Linie an die Leser in der Bundesrepublik. Da jedoch den von ihr aufgelisteten Pflanzenarten und den darin aufgeworfenen Problemen grenzüberschreitende Bedeutung zukommt, werden auch die Benützer helvetischer Provenienz von der Fülle wertvoller Informationen profitieren. Die Anschaffung dieses Buches kann deshalb bestens empfohlen werden.

Alfred Lichti

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136/3*: 151–161

Die lichtabhängige Kontrolle der Chloroplastenentwicklung bei höheren Pflanzen

Klaus Apel, ETH-Zürich

Bei Abwesenheit von Licht bilden höhere Pflanzen einen etiolierten Keimling, dessen Plastiden noch kein Chlorophyll besitzen. Der Chlorophyllbiosyntheseweg führt in den sogenannten Etioplasten zur Bildung der unmittelbaren Chlorophyllvorstufe, dem Protochlorophyllid. Erst mit Beginn der Belichtung wird das Protochlorophyllid zum Chlorophyllid reduziert. Gleichzeitig mit der dann einsetzenden Chlorophyllakkumulation erfolgt im Licht der Aufbau des Photosyntheseapparates. Die Umgestaltung des Membransystems beim lichtinduzierten Übergang des Etioplasten zum Chloroplasten wird von mindestens zwei verschiedenen genetischen Systemen kontrolliert, die im Kern bzw. im Plastiden lokalisiert sind. Nur ein verhältnismässig kleiner Teil der Plastidenproteine wird von der Plastiden DNA aus kodiert und an den plastideneigenen Ribosomen in den Organellen synthetisiert. Der grössere Teil der Plastidenproteine wird von der Kern-DNA aus kodiert und erst nach der Synthese an den cytosolischen Ribosomen als höhermolekulare Vorstufe in das Organell transportiert und dort prozessiert. Das Wechselspiel beider genetischer Systeme wird zusätzlich noch durch den Aussenfaktor Licht beeinflusst. Die Lichtwirkung wird dabei über mindestens zwei verschiedene Photorezeptoren vermittelt. Die Synthese von mehreren kernkodierten Plastidenproteinen, deren Erscheinen im Plastiden durch Licht kontrolliert wird, wird auf dem Transkriptionsniveau über den Photorezeptor Phytochrom gesteuert. Daneben ist als zweiter Photorezeptor die Protochlorophyllid-Reduktase in den Plastiden an der Steuerung der lichtabhängigen Chloroplastenentwicklung beteiligt. Das Zusammenwirken beider Photorezeptoren wird am Beispiel von Mutanten analysiert, bei denen die Wirkung jeweils eines der beiden Photorezeptoren ausgeschaltet worden ist.

The Light-Dependent Control of Chloroplast Development in Higher Plants

In the absence of light higher plants form etiolated seedlings whose plastids are devoid of chlorophyll. In these socalled etioplasts the biosynthesis of chlorophyll leads only to the formation of the immediate precursor of chlorophyll, to protochlorophyllide. The subsequent reduction of protochlorophyllide to chlorophyllide requires light. Upon illumination of etiolated higher plants chlorophyll accumulation starts and at the same time the photosynthetically active membrane system of chloroplasts develops. The light-induced transformation of etioplasts to chloroplasts is controlled by at least two different genetic systems. To a lesser part plastid proteins are encoded by the plastid DNA and the resulting mRNAs are translated at plastid-specific ribosomes. The majority of plastid proteins are encoded by nuclear genes and are synthesized in the cytosol as higher molecular weight precursor polypeptides that are transported into and processed within the plastid compartement. The interaction of the two genetic systems is under the control of light. The effect of light is mediated by at least two distinct photoreceptors. Phytochrome as one of these photoreceptors controls the transcription of nuclear genes that encode light-dependent plastid proteins. The second photoreceptor, the protochlorophyllide reductase, catalyzes the light-dependent reduction of protochlorophyllide to chlorophyllide within the plastid and affects also the light-dependent chloroplast development. The interaction of these photoreceptors has been studied in mutants in which the function of either one of the two photoreceptors has been abolished by mutations.

1 Einleitung

Die Entwicklung höherer Pflanzen wird auf vielfältige Art durch Licht beeinflusst. Bei Abwesenheit von Licht wird beim heranwachsenden Keimling das

Längenwachstum extrem gefördert. Die Blattanlagen werden sehr stark zurückgehalten, während die Sprossabschnitte zwischen den einzelnen Blattanlagestellen sehr stark in die Länge ausgezogen werden. Mit dieser gewählten Entwicklungsstrategie, die als Etiolement bezeichnet wird, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass ein im Dunkeln angezogener Keimling das lebensnotwendige Aussenlicht während seiner frühen Entwicklungsphase erreicht. Bei der im Licht angezogenen Keimlingspflanze fällt auf, dass hier die einzelnen Abschnitte zwischen den Blattansatzstellen in der Länge deutlich reduziert und gleichzeitig die Blattanlagen sehr grossflächig ausgebildet werden, insgesamt also eine Gestalt ausgeprägt wird, die es der Pflanze optimal ermöglicht, Licht für Photosynthese auszunutzen. Die im Licht ablaufende Entwicklung wird als Photomorphogenese bezeichnet. Etiolement und Photomorphogenese sind ein Kennzeichen der Angiospermenpflanzen.

2 Der Photorezeptor Phytochrom

Die Analyse der Lichtwirkung auf die pflanzliche Entwicklung konzentrierte sich in der Vergangenheit vor allem auf die Charakterisierung der Photorezeptoren, die das Lichtsignal in der Pflanze weitergeben. Die Steuerung der lichtabhängigen Entwicklung wird bei höheren Pflanzen vor allem vom Photorezeptor Phytochrom reguliert (E.M. Tobin u. J. Silverthorne, 1985). Phytochrom kommt in zwei verschiedenen Zuständen vor, im Dunkeln in einer inaktiven Form, die nach Belichtung, zum Beispiel mit Rotlicht, in die zweite physiologisch aktive Form umgewandelt wird. Ausgehend von der aktiven Phytochromform werden über angeschlossene Signalketten eine Reihe von Folgeprozessen ausgelöst, die in ihrer Gesamtheit zur Photomorphogenese führen. Inzwischen ist das Phytochromsystem sehr eingehend analysiert worden. So sind beispielsweise schon mehrere Gene, die für den Proteinanteil des Photorezeptors kodieren, isoliert und sequenziert worden. Ausgehend von den Gensequenzen liessen sich die entsprechenden Aminosäuresequenzen der Proteine ableiten. Dabei stellte sich heraus, dass es offensichtlich mehrere Phytochromformen gibt. In etiolierten höheren Pflanzen finden wir beispielsweise eine speziell hier auftretende Phytochromform, die im Dunkeln in relativ grossen Mengen auftritt und deren Konzentration bei Belichtung rasch abnimmt. Daneben tritt bei höheren Pflanzen mindestens eine weitere Phytochromform auf, die in wesentlich geringeren Konzentrationen sowohl im Dunkeln als auch im Licht in höheren Pflanzen nachgewiesen werden kann. Während die zuerst genannte Phytochromform anscheinend bei der Keimlingsentwicklung höherer Pflanzen den Übergang vom Etiolement zur Photomorphogenese steuert, vermutet man, dass die zweite Phytochromform vor allem das Wachstum lichtadaptierter Pflanzen steuert. Eine ähnliche Phytochromform scheint auch bei den niederen Pflanzen verbreitet zu sein. Über die endogenen Signale, die nach Aktivierung des Phytochromsystems in der Pflanze freigesetzt werden und den Ablauf der Photomorphoge-

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/3: 151–161

Die lichtabhängige Kontrolle der Chloroplastenentwicklung bei höheren Pflanzen

Klaus Apel, ETH-Zürich

Bei Abwesenheit von Licht bilden höhere Pflanzen einen etiolierten Keimling, dessen Plastiden noch kein Chlorophyll besitzen. Der Chlorophyllbiosyntheseweg führt in den sogenannten Etioplasten zur Bildung der unmittelbaren Chlorophyllvorstufe, dem Protochlorophyllid. Erst mit Beginn der Belichtung wird das Protochlorophyllid zum Chlorophyllid reduziert. Gleichzeitig mit der dann einsetzenden Chlorophyllakkumulation erfolgt im Licht der Aufbau des Photosyntheseapparates. Die Umgestaltung des Membransystems beim lichtinduzierten Übergang des Etioplasten zum Chloroplasten wird von mindestens zwei verschiedenen genetischen Systemen kontrolliert, die im Kern bzw. im Plastiden lokalisiert sind. Nur ein verhältnismässig kleiner Teil der Plastidenproteine wird von der Plastiden DNA aus kodiert und an den plastideneigenen Ribosomen in den Organellen synthetisiert. Der grössere Teil der Plastidenproteine wird von der Kern-DNA aus kodiert und erst nach der Synthese an den cytosolischen Ribosomen als höhermolekulare Vorstufe in das Organell transportiert und dort prozessiert. Das Wechselspiel beider genetischer Systeme wird zusätzlich noch durch den Aussenfaktor Licht beeinflusst. Die Lichtwirkung wird dabei über mindestens zwei verschiedene Photorezeptoren vermittelt. Die Synthese von mehreren kernkodierten Plastidenproteinen, deren Erscheinen im Plastiden durch Licht kontrolliert wird, wird auf dem Transkriptionsniveau über den Photorezeptor Phytochrom gesteuert. Daneben ist als zweiter Photorezeptor die Protochlorophyllid-Reduktase in den Plastiden an der Steuerung der lichtabhängigen Chloroplastenentwicklung beteiligt. Das Zusammenwirken beider Photorezeptoren wird am Beispiel von Mutanten analysiert, bei denen die Wirkung jeweils eines der beiden Photorezeptoren ausgeschaltet worden ist.

The Light-Dependent Control of Chloroplast Development in Higher Plants

In the absence of light higher plants form etiolated seedlings whose plastids are devoid of chlorophyll. In these socalled etioplasts the biosynthesis of chlorophyll leads only to the formation of the immediate precursor of chlorophyll, to protochlorophyllide. The subsequent reduction of protochlorophyllide to chlorophyllide requires light. Upon illumination of etiolated higher plants chlorophyll accumulation starts and at the same time the photosynthetically active membrane system of chloroplasts develops. The light-induced transformation of etioplasts to chloroplasts is controlled by at least two different genetic systems. To a lesser part plastid proteins are encoded by the plastid DNA and the resulting mRNAs are translated at plastid-specific ribosomes. The majority of plastid proteins are encoded by nuclear genes and are synthesized in the cytosol as higher molecular weight precursor polypeptides that are transported into and processed within the plastid compartement. The interaction of the two genetic systems is under the control of light. The effect of light is mediated by at least two distinct photoreceptors. Phytochrome as one of these photoreceptors controls the transcription of nuclear genes that encode light-dependent plastid proteins. The second photoreceptor, the protochlorophyllide reductase, catalyzes the light-dependent reduction of protochlorophyllide to chlorophyllide within the plastid and affects also the light-dependent chloroplast development. The interaction of these photoreceptors has been studied in mutants in which the function of either one of the two photoreceptors has been abolished by mutations.

1 Einleitung

Die Entwicklung höherer Pflanzen wird auf vielfältige Art durch Licht beeinflusst. Bei Abwesenheit von Licht wird beim heranwachsenden Keimling das

tein. Das Erscheinen dieses Proteins fällt zeitlich zusammen mit der massiv einsetzenden Chlorophyllakkumulation. Die ähnliche Kinetik beim Auftreten des Proteins und des Chlorophylls ist nicht zufällig, sondern deutet auf einen engen funktionellen Zusammenhang beider Membrankomponenten hin. Das Protein bindet den mit Abstand grössten Anteil des Chlorophylls an sich. Es wurde als «light-harvesting chlorophyll-ab-protein» (LHCP) beschrieben und stellt das mengenmässig auffälligste Antennenpigmentprotein dar, dessen Aufgabe im wesentlichen darin besteht zusätzlich Lichtenergie zu absorbieren und diese Lichtenergie auf die eigentlichen Reaktionszentren des Elektronentransportweges zu übertragen. Der durch Licht ausgelöste Ergrünungsvorgang kann somit als ein Versuch verstanden werden, über den Einbau von Antennenpigmentproteinkomplexen in die Membran die Effizienz der Lichtausbeute für Photosynthese zu optimieren. Neben den durch Licht induzierten Proteinen in der zweiten Gruppe finden sich schliesslich in der dritten Gruppe auch Polypeptide, die im Dunkeln in relativ hohen Konzentrationen auftreten und deren Konzentration dann mit Beginn der Belichtung drastisch abnimmt. Das auffälligste dieser Proteine hat ein apparentes Molekulargewicht von 36 000 und stellt das mit Abstand häufigste Membranprotein der Etioplasten dar. Es handelt sich um die NADPH-Protochlorophyllid Oxidoreduktase (Pchlid-Reduktase), ein Enzym, das die Umwandlung des Protochlorophyllids in das Chlorophyllid katalysiert. Auf den ersten Blick erscheint es paradox und schwer erklärlich, dass ein Enzym der Chlorophyllbiosynthese zum Zeitpunkt der massiven Chlorophyllakkumulation nur noch in geringen Spuren auftritt, während es im Dunkeln mit Abstand das häufigste Protein der Etioplasten darstellt. Wir werden am Ende dieses Artikels dieses Problem noch einmal diskutieren und dabei versuchen, eine Erklärung anzubieten.

4 Die Rolle von zwei verschiedenen genetischen Systemen während der Chloroplastenentwicklung

Am Beispiel des LHCP und der Protochlorophyllid-Reduktase wurde versucht einige der molekularen Regulationsmechanismen aufzuklären über die Licht die Entwicklung höherer Pflanzen beeinflussen kann. Die Analyse der Lichtwirkung auf das Erscheinen dieser beiden Proteine wird dadurch verkompliziert, dass die Synthese von Plastidenproteinen über mindestens zwei verschiedene genetische Systeme gesteuert werden kann. Chloroplasten besitzen eine eigene DNA, von der mRNA abgelesen werden kann, die über die plastideneigenen Ribosomen in Proteine umgesetzt werden. Vor wenigen Jahren ist es gelungen, in zwei höheren Pflanzenarten die Chloroplasten-DNA vollständig zu sequenzieren. Aus diesen Nukleinsäuresequenzen konnte abgeleitet werden, ss nur ein verhältnismässig kleiner Teil der Plastidenproteine von dieser nelleneigenen DNA kodiert wird. Der überwiegende Anteil der Plastiden- eine wird durch ein zweites genetisches System kodiert, das im Kern

lokalisiert ist. Die Entwicklung des Plastiden setzt deshalb eine sehr genaue Abstimmung dieser beiden verschiedenen genetischen Systeme voraus. Eine der Hauptfragen, die z.Z. untersucht wird, ist die Art und Weise, wie Licht regulierend in dieses Zusammenspiel der beiden genetischen Systeme einwirken kann. Im Falle des LHCP und der Protochlorophyllid-Reduktase konnte gezeigt werden, dass beide Proteine von der Kern-DNA aus kodiert werden. Die abgelesenen mRNAs werden im Zytosol an den dort liegenden zytoplasmatischen Ribosomen in lösliche Vorstufen-Polypeptide umgesetzt; diese Polypeptide werden anschliessend in den Plastiden hineintransportiert und dort zum reifen Protein prozessiert. Parallel zur lichtinduzierten Veränderung der Konzentration der beiden Plastidenproteine werden die Konzentrationen der entsprechenden mRNAs durch Licht ebenfalls verändert. Im Falle des LHCP treten im Dunkeln nur Spuren der entsprechenden mRNA auf. Erst mit Beginn der Belichtung nimmt die Menge dieser mRNA sehr rasch zu. Im Falle der Protochlorophyllid-Reduktase wird die Konzentration der mRNA genau umgekehrt reguliert. Hier treten im Dunkeln relativ hohe Konzentrationen der mRNA auf, die dann mit einsetzender Belichtung drastisch abnehmen. In beiden Fällen konnte gezeigt werden, dass der Lichteffekt auf die mRNA-Konzentration über eine durch Licht gesteuerte Veränderung der DNA-Transkription reguliert wird. Im Falle des LHCP wird das Gen im Dunkeln kaum transkribiert. Die Transkriptionsrate steigt erst mit Beginn der Belichtung drastisch an. Im Falle der Protochlorophyllid-Reduktase wird das entsprechende Gen im Dunkeln in sehr grossem Umfang transkribiert, erst mit Beginn der Belichtung nimmt dann die Transkriptionsrate des Protochlorophyllid-Reduktase-Gens rasch ab. In beiden Fällen wird diese Veränderung der Transkriptionsrate über den gleichen Photorezeptor, das Phytochrom, gesteuert. Das Phytochromsystem kann offensichtlich auf inverse Art gleichzeitig die Transkription bestimmter Kerngene induzieren und die Transkription anderer Kerngene inhibieren.

5 Die Rolle von zwei verschiedenen Photorezeptoren während der Choroplastenentwicklung

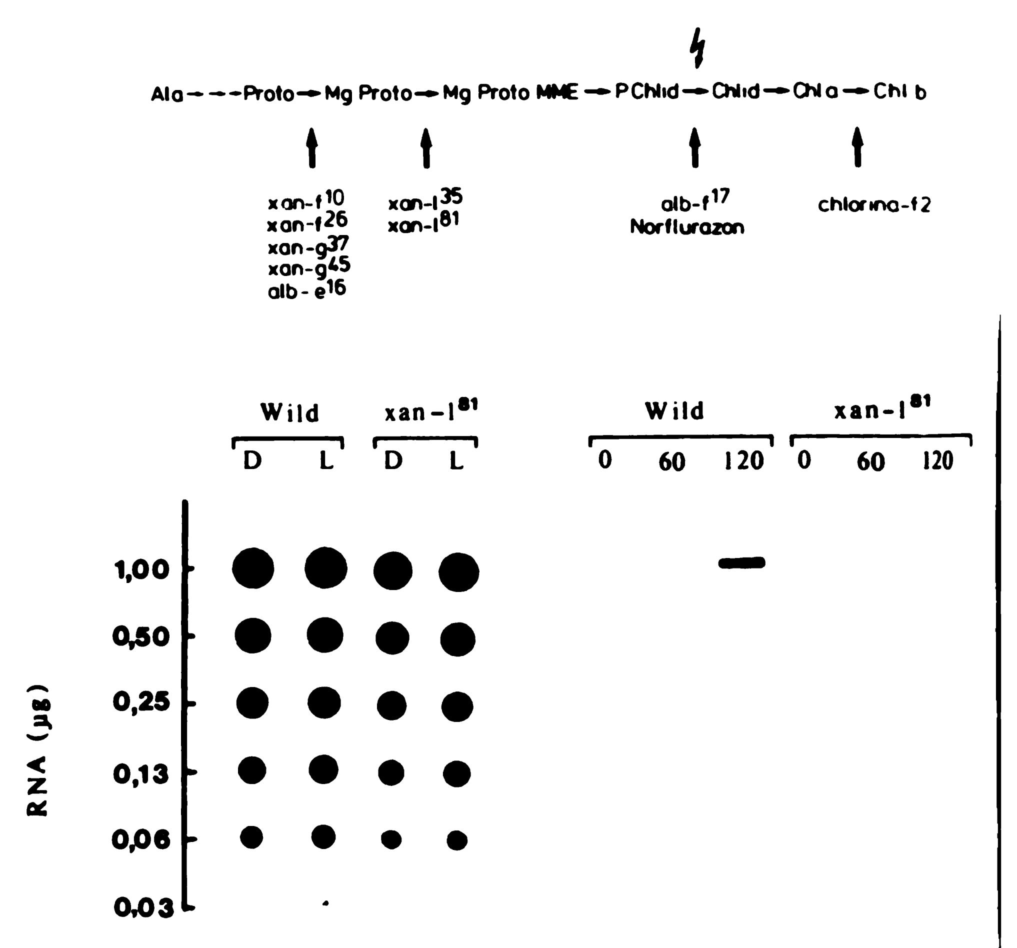
Die bisher beschriebenen Versuche haben gezeigt, dass Licht die Entwicklung des Chloroplasten dadurch beeinflussen kann, dass unter Beteiligung des Phytochroms selektiv die Transkription von Kerngenen verändert wird, die für Plastidenproteine kodieren. Unklar ist bislang, ob auch die von der Plastiden-DNA aus kodierten Proteine auf gleiche Weise durch Licht beeinflusst werden können und ob hierbei ebenfalls nur das Phytochromsystem oder möglicherweise ein weiterer Photorezeptor beteiligt ist. Bislang wurde in etiolierten Pflanzen das Phytochromsystem durch Rotlichtbehandlung aktiviert. Es ist bekannt, dass neben dem Phytochromsystem andere Pigmente in Pflanzen auftreten, die im gleichen Wellenlängenbereich absorbieren können. Um eine Beteiligung des Phytochromsystems eindeutig abklären zu können ist es deshalb notwendig, mit

einer anderen Wellenlänge zu arbeiten, bei der dann eine Aktivierung anderer pflanzeneigener Pigmentsysteme ausgeschaltet werden kann. Solche Bedingungen liegen vor, wenn Pflanzen im Dauerdunkelrot bestrahlt werden. In diesem Fall wird ausschliesslich nur das Phytochromsystem aktiviert, andere Pigmentsysteme der Pflanzen sind nicht mehr in der Lage in diesem langwelligen Dunkelrotbereich das angebotene Licht zu absorbieren. Wenn man ein solches Bestrahlungsexperiment mit etiolierten Keimlingen durchführt, erhält man ein überraschendes Ergebnis. Im Weiss- und Rotlicht wächst ein lichtangepasster Keimling aus, bei dem das Längenwachstum im Vergleich zu etiolierten Keimlingen sehr stark reduziert wird und gleichzeitig die Keimblätter grossflächig angelegt werden. Der Keimling besitzt Chlorophyll und ist im Licht photosynthetisch aktiv. Bei Dauerdunkelrotbehandlung wird ein ähnlich aussehender Keimling ausgebildet, bei dem ebenfalls eine lichtangepasste Gestalt mit reduziertem Längenwachstum und grossflächigen Keimblättern entwickelt wird. Die Ausbildung der an das Licht angepassten Gestalt des Keimlings wird offensichtlich allein über das Phytochromsystem gesteuert. Im Gegensatz zu den im Weiss- oder Rotlicht angezogenen Keimlingen akkumuliert aber der im Dauerdunkelrot gewachsene Keimling kein Chlorophyll und besitzt weiterhin Etioplasten ähnlich dem im Dunkeln angezogenen Keimling. Die Chlorophyllakkumulation als wichtiger Teil der Chloroplastenentwicklung steht deshalb nicht unter direkter Kontrolle des Phytochroms, sondern wird über einen weiteren Photorezeptor reguliert, der nicht im Dunkelrot-, wohl aber im Rot- oder Weisslicht absorbiert. Der im Dauerdunkelrot angezogene Keimling ist gleichsam in die Irre geführt worden. Über das Phytochrom wird die Anwesenheit von Licht signalisiert. Dieses führt zur Ausbildung der lichtangepassten Gestalt des Keimlings. Über einen weiteren Photorezeptor wird dagegen «Dunkelheit» angezeigt, so dass die Ausbildung des Chloroplasten unterbleibt. Unter natürlichen Bedingungen werden beide Photorezeptoren gleichzeitig aktiviert, die dann zu einer normalen Entwicklung des photosynthetisch kompetenten Keimlings führen. Der zweite Photorezeptor konnte als die Protochlorophyllid-Reduktase identifiziert werden. Licht wird vom Protochlorophyllid selbst absorbiert. Nach Anregung des Pigments erfolgt die Reduktion zum Chlorophyllid (M. Harpster u. K. Apel, 1985).

6 Die Funktion der Protochlorophyllid-Reduktase

Es stellt sich die Frage, ob die lichtabhängige Umwandlung des Protochlorophyllid zum Chlorophyllid einen direkten Einfluss auf die Expression der chloroplasteneigenen Gene hat und wenn ja, an welcher Stufe innerhalb der Proteinbiosynthese diese mögliche Wirkung einsetzt. Um diese Frage zu analysieren, wurde ein weiteres plastidenspezifisches Protein ausgesucht, von dem bekannt ist, dass es von der plastideneigenen DNA aus kodiert wird und erst im Verlauf der lichtabhängigen Ergrünung neu in das Membransystem einge-

schleust wird. Bei diesem Protein handelt es sich um das chlorophyllbindende Reaktionszentrumprotein des Photosystems I (P700-Protein). Im Dunkeln tritt dieses Protein nicht in der Membranfraktion auf und wird erst im Verlaufe der Ergrünung massiv in die sich entwickelnden Thylakoidmembranen eingeschleust. Der mögliche Einfluss des Chlorophylls auf die Akkumulation dieses Proteins wurde auf folgende Art untersucht: In Wildtypgerstenpflanzen wurde die Gesamt-RNA aus den Etioplasten bzw. Chloroplasten isoliert. Gleiche Mengen dieser RNA wurden auf einem Trägermaterial aufgetragen und mit einer DNA-Probe, die spezifisch für das plastideneigene Gen des Reaktionszentrumproteins ist, inkubiert. Nur in den Fällen, bei denen das entsprechende Transkript für dieses Protein innerhalb der Gesamt-RNA vorliegt, sollte durch Hybridisierung die zugegebene radioaktiv markierte genspezifische Probe festgehalten werden und auf einem Röntgenfilm eine Schwärzung verursachen. Beim Vergleich der RNA-Proben aus Dunkel- und Lichtplastiden geht deutlich hervor, dass gleiche Mengen der mRNA für das P700-Protein vorliegen (Bild 1). Im Gegensatz zu der kernkodierten mRNA für das LHCP, deren Konzentration bei Belichtung drastisch erhöht wird, verändert sich im Falle des P700-Proteins des Photosystems I die Konzentration der mRNA unter Lichteinfluss nicht. Die nach Belichtung einsetzende Akkumulation des Reaktionszentrumproteins muss deshalb auf andere Art reguliert werden. Durch Zugabe von radioaktiv markierten Aminosäuren wurde die Synthese des Proteins im Keimling verfolgt. Im Dunkeln wird das Protein nicht sichtbar synthetisiert, erst nach Beginn der Belichtung kann das neu synthetisierte Protein durch Immunfällung mit spezifischen Antikörpern nachgewiesen werden (Bild 1). Der mögliche Einfluss der Protochlorophyll-Chlorophyll-Transformation auf die Synthese dieses Proteins wurde über einen zweiten experimentellen Ansatz untersucht. In diesem Fall wurde eine Mutante benutzt, bei der der Schritt vom Magnesiumprotoporphyrin zum Magnesiumprotoporphyrinmonomethylester geblockt war (Bild 1). Diese Mutante ist nicht mehr in der Lage bei Belichtung zu ergrünen. Zuerst wurde die Konzentration der mRNA für das Reaktionszentrumprotein in etiolierten und belichteten Mutantenpflanzen analysiert. Es stellte sich heraus, dass die gleiche Menge der mRNA wie in den Wildtyppflanzen nachgewiesen werden konnte. Auch in der Mutante tritt eine vergleichbare Konzentration der mRNA sowohl im Dunkeln als auch im Licht auf (Bild 1). Damit wäre die Mutante prinzipiell in der Lage, das Reaktionszentrumprotein zu synthetisieren. Bei dem zweiten Experiment zeigte sich allerdings, dass nach Inkubation der Mutantenblätter mit radioaktiv markierten Aminosäuren im Dunkeln bzw. im Licht keine neu synthetisierten Proteine über Immunfällung nachgewiesen werden konnten. Die Akkumulation des Proteins findet in der Mutante bei Belichtung nicht statt. Nachfolgende Untersuchungen konnten zeigen, dass die Translation der mRNA nur bei Vorliegen von Chlorophyll im Licht ablaufen kann. Damit haben wir eine zweite lichtabhängige Kontrollstelle gefunden, die zusätzlich neben dem Phytochrom die lichtabhängige Umwandlung des Etioplasten zum Chloroplasten steuern kann. Neben der phytochromabhängigen



Kontrolle von Kerngenen wird gleichzeitig über die lichtabhängige Protochlorophyllid-Chlorophyllid-Transformation in den Plastiden die Biogenese von Plastidenproteinen gesteuert.

7 Der «Plastidenfaktor»

Innerhalb dieses komplexen Zusammenspiels von zwei Photorezeptoren mit zwei verschiedenen genetischen Systemen konnte vor kurzem mit dem «Plastifaktor» noch ein weiteres Glied in der lichtabhängigen Kontrolle der Chloastenbildung bei höheren Pflanzen nachgewiesen werden (W.C. Taylor. 9). Alle bisher geschilderten Versuche, bei denen die Interaktion vom ytochrom und Protochlorophyllid-Reduktase während der Expression von 1 Plastidengenen gefunden wurde, sind mit Wildtyppflanzen durchge-

◀ Bild 1 Die lichtabhängigen Veränderungen in der Konzentration der mRNA und des frisch synthetisierten P700-Proteins des Photosystems I in Wildtyppflanzen und in der xantha-l[81] Mutante der Gerste. Der obere Teil des Bildes zeigt den Schritt im Chlorophyllbiosyntheseweg, der in der xantha-l[81] Mutante blockiert ist. Der untere linke Teil zeigt die relative Konzentration der mRNA für das P700-Protein in etiolierten (D) und belichteten (L) Wiltyp- und Mutantenpflanzen nach «dot-blot»-Hybridisierung. Gleiche Mengen von plastideneigener Gesamt-RNA wurden in einer Verdünnungsreihe auf einem RNA-bindenden Filter aufgetragen und mit einer ^{32}Phosphor-markierten DNA-Probe inkubiert, die einen Teil des P700-Proteingens auf der Plastiden-DNA abdeckt. Unter den gewählten Inkubinatiosbedingungen sollte die zugegebene radioaktive DNA-Probe nur an den vorhandenen mRNA-Molekülen für das P700-Protein binden. Gleiche Schwärzung auf dem Autoradiogramm zeigt deshalb eine gleiche relative Konzentration dieser spezifischen mRNA innerhalb der Gesamt-RNA an.
Im rechten unteren Teil des Bildes wird die Synthese des P700-Proteins in Blättern von Wildtyp- bzw. Mutantenkeimlingen gemessen, die entweder für 4 Stunden im Dunkeln gehalten wurden (0) oder für die letzten 60 Minuten (60) bzw. 120 Minuten (120) belichtet wurden. Abgeschnittene Blätter wurden mit radioaktiv markiertem Methionin inkubiert, das P700-Protein mit einem spezifischen Antikörper aus dem Blattextrakt gefällt und anschliessend elektrophoretisch in einem Polyacrylamidgel aufgetrennt und über Autoradiographie sichtbar gemacht.

Fig. 1 Light-dependent changes in the amounts of mRNA and of freshly synthesized P700 chlorophyll-a protein of photosystem I in wild-type and the xantha-l[81] mutant of barley. The upper part of the figure illustrates the step of chlorophyll biosynthesis which is blocked in the xantha-l[81] mutant. In the lower left part levels for the P700 protein mRNA in the dark-grown (D) and illuminated (L) plants were determined by dot-blot hybridization. In the lower right part the synthesis of the P700 protein was determined by feeding radioactively labelled methionine for 4 h to dark-grown leaves of wild-type and mutant plants. During incubation, leaves were kept in the dark (0) or exposed for the last 60 (60) or 120 (120) minutes to continuous white light. The labelled P700 protein was immunoprecipitated from total leaf extracts, separated electrophoretically and visualized by autoradiography.

führt worden, bei denen sich die Chloroplasten im Licht normal entwickeln. Wenn man diese Versuche mit Pflanzen wiederholt, bei denen die Chloroplastenbildung aufgrund einer Mutation oder nach Behandlung mit bestimmten Herbiziden blockiert ist, stellt sich heraus, dass die in Wildtyppflanzen durch Licht ausgelöste Steigerung der Transkription von Kerngenen z.B. für das LHCP nicht mehr stattfindet. Aktives Phytochrom ist in diesen Pflanzen vorhanden und stimuliert weiterhin die Transkription von Kerngenen, die nicht für Plastidenproteine, sondern für andere lichtabhängige Proteine kodieren. Ausserdem läuft in diesen Pflanzen die normale phytochromgesteuerte Photomorphogenese ab. Lediglich die Transkription von Kerngenen, die für bestimmte Plastidenproteine kodieren, wird bei Blockade der Plastidenentwicklung selektiv gehemmt. Man muss vermuten, dass in belichteten Wildtyppflanzen vom sich entwickelnden Chloroplasten ein plastideneigener Faktor («Plastidenfaktor») freigesetzt wird, der in der Lage ist, zusammen mit aktivem Phytochrom

die Transkription dieser Kerngene zu stimulieren. Über die stoffliche Identität des Plastidenfaktors ist bisher nichts bekannt.

Wir haben versucht in unseren eigenen Arbeiten diesen zusätzlichen Regulationsfaktor zu identifizieren. Dabei gehen wir von der Arbeitshypothese aus, dass die Freisetzung des Plastidenfaktors eng mit der Aktivität der lichtabhängigen Protochlorophyllid-Reduktase zusammenhängt (A. Batschauer et al., 1986). Diese Vorstellung wird bisher durch folgende Ergebnisse unterstützt: 1. Die lichtabhängige Protochlorophyllid-Reduktase zeichnet sich durch eine Reihe von Eigenschaften aus, die zeigen, dass das Enzym nicht ausschliesslich nur einen von vielen Schritten im Chlorophyll-Biosyntheseweg katalysiert, sondern darüber hinaus auch an der lichtabhängigen Regulation der Chloroplastenentwicklung beteiligt ist. So gehört in Etioplasten die Protochlorophyllid-Reduktase mit zu den häufigsten Proteinen. Nach Belichtung nimmt sowohl die Enzymaktivität als auch die Menge des Enzymproteins sehr rasch ab. Zum Zeitpunkt der maximalen Chlorophyllakkumulation sind nur noch Spuren des Enzymproteins nachweisbar. Neben dem Protein nimmt auch die mRNA in ihrer Konzentration nach Belichtung ab. Eine ähnliche negative Lichtregulation findet sich auch bei der in höheren Pflanzen auftretenden Phytochromform I, deren hohe Konzentration in etiolierten Pflanzen nach Belichtung ebenfalls sehr rasch abnimmt. Diese erstaunliche Übereinstimmung zwischen beiden Proteinen könnte damit zusammenhängen, dass durch die stark erhöhte Konzentration beider Photorezeptoren eine gesteigerte Lichtempfindlichkeit erreicht wird, durch die der etiolierte Keimling schon bei geringer Lichtbestrahlung sehr empfindlich mit der Ausbildung des Chloroplasten beginnen kann. 2. Die lichtabhängige Protochlorophyllid-Reduktase tritt bei den höheren Samenpflanzen (Angiospermen) auf, während bei den übrigen Pflanzen bis hin zu den Gymnospermen Chlorophyll schon im Dunkeln von einer lichtunabhängigen Protochlorophyllid-Reduktase synthetisiert wird. Kernkodierte Plastidenproteine, deren Synthese in Angiospermenpflanzen erst nach Belichtung induziert wird, werden bei den übrigen Pflanzengruppen schon im Dunkeln akkumuliert. Es scheint also ein enger Zusammenhang zu bestehen zwischen dem Auftreten einer lichtabhängigen Protochlorophyllid-Reduktase, der Freisetzung des Plastidenfaktors und der Fähigkeit, im Dunkeln Etioplasten auszubilden, die erst nach Belichtung dann in photosynthetisch aktive Chloroplasten umgewandelt werden. Wir versuchen, die vermutete Bedeutung der Protochlorophyllid-Reduktase bei der Freisetzung des Plastidenfaktors durch eine Kombination von klassisch genetischen Ansätzen mit Methoden der Molekularbiologie zu überprüfen. Dazu wurden bisher zwei verschiedene Gruppen von Mutanten bei der höheren Pflanze *Arabidopsis thaliana* isoliert. Bei der ersten Gruppe handelt es sich um Mutanten, die in verschiedenen Schritten der Chlorophyll-Biosynthese geblockt sind. Alle diese Mutanten sind bei Belichtung nicht in der Lage, einen normalen chlorophyllhaltigen Chloroplasten auszubilden. Besonders interessant ist dabei eine Mutante, die keine aktive lichtabhängige Protochlorophyllid-Reduktase besitzt. In der zweiten Gruppe von Mutanten steht die normalerweise

lichtgesteuerte Photomorphogenese nicht mehr unter Kontrolle des aktiven Phytochroms. Hier wird die lichtangepasste Gestalt des Keimlings schon im Dunkeln ausgebildet. Beide Mutantengruppen erlauben es, gezielt jeweils einen der beiden Photorezeptoren auszuschalten oder diese in modifizierter Form in transgenen Pflanzen zu exprimieren. Dazu wurde bisher das Gen für eine lichtunabhängige Protochlorophyllid-Reduktase aus Kiefern isoliert. Nach Übertragung in die Mutanten von *Arabidopsis thaliana* sollte die Expression dieses Gens schon im Dunkeln zu einer Chlorophyllsynthese führen. Die für uns wichtige Frage wird sein, wie in solch transgenen Pflanzen das Zusammenspiel zwischen Kern- und Plastidengenen verändert wird, und ob unter diesen Bedingungen der Plastidenfaktor im Dunkeln freigesetzt wird und ähnlich wie schon bei den niederen Pflanzen die Ausbildung des Photosyntheseapparates bei Abwesenheit von Licht ermöglicht. Durch diese Untersuchung sollte es möglich sein, das komplexe Zusammenspiel verschiedener Zellkompartimente während der lichtabhängigen Ausbildung des Photosyntheseapparates höherer Pflanzen weiter aufzuklären.

8 Literatur

Batschauer, A., Mösinger, E., Kreuz, K., Dörr, I. u. Apel, K. (1986), The implication of a plastid-derived factor in the transcriptional control of nuclear genes encoding the light-harvesting chlorophyll a/b protein. Eur. J. Biochem. *154:* 625–634.

Harpster, M. und Apel, K. (1985), The light-dependent regulation of gene expression during plastid development in higher plants. Physiol. Plant. *64:* 147–152.

Nagy, F., Kay, S.A. u. Chua, N.H. (1988), Gene regulation by phytochrome. Trends in Genetics *4:* 37–42.

Taylor, W.C. (1989), Regulatory interactions between nuclear and plastid genomes. Annu. Rev. Plant Physiol. and Plant Mol. Biol. *40:* 211–233

Tobin, E.M. u. Silverthorne, J. (1985), Light regulation of gene expression in higher plants. Annu. Rev. Plant. Physiol. *36:* 569–593.

Prof. Dr. Klaus Apel, Institut für Pflanzenwissenschaften ETH, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich

Buchbesprechung

Otto Sonntag (Hrsg.): The Correspondence between Albrecht von Haller and Horace-Bénédict de Saussure. Hans Huber Publishers, Bern, Stuttgart, Toronto 1990. 507 Seiten, Preis Fr. 78.–.

Die Albrecht-von-Haller-Stiftung der Burgergemeinde Bern legt in ihrer Reihe «Studia Halleriana» bereits den dritten Band vor: Während Band 2 «Johannes Gessners Tagebuch 1727» kommentiert und übersetzt, sind die Bände 1 und 3 der umfangreichen Korrespondenz Albrecht von Hallers gewidmet, einerseits mit dem Genfer Charles Bonnet (Band 1; siehe Rezension in Heft 1983/3 der NGZ), und im neuen, wiederum von Otto Sonntag edierten Band, mit Bonnets Neffen Horac-Bénédict de Saussure. – Der um eine Generation ältere Haller (1708–1777) gewinnt Interesse an dem jungen de Saussure (1740–1799), vor allem hinsichtlich dessen Bewunderung und Erforschung der Bergwelt, für die er in den «Voyages dans les Alpes» schriftliches Zeugnis ablegt. Weitere Briefthemen beziehen sich auf botanische Studien, auf die Medizin und nicht zuletzt auch auf politische Aspekte der Zeit. – Die innere Übereinstimmung und die gegenseitige Anteilnahme der beiden Korrespondenten werden vom Herausgeber eindrücklich belegt und kommen in den Briefen von Mal zu Mal besser zum Ausdruck als eindrückliches Zeugnis einer besonderen Form von Schriftlichkeit.

Die Einführung in die Lebensumstände der beiden Briefschreiber, die Bemerkungen zu methodischen Arbeiten der Buchedition sowie die Kommentare zum Briefwechsel an sich sind lesenswerte Vorbereitungen für die eigentliche Brieflektüre. Und wenn die beiden von Otto Sonntag betreuten Bände Anlass sein könnten für Studien zur Briefkultur des 18. Jahrhunderts, dann wäre gleichzeitig noch ein weiteres Ziel erreicht. So könnten beispielsweise die lobende Feststellung Otto Sonntags: "It is a tribute to the rapidity and reliability of the Post of Bern that many letters reached their recipient ... on the day after they were sent" einerseits und die Kritik Hans Georg Gadamers: «So ist es bezeichnend, dass die Verkürzung der Postzeiten durchaus nicht zu einer Intensivierung dieser Kommunikationsform geführt hat, sondern im Gegenteil zum Verfall der Kunst des Briefschreibens.» (in «Wahrheit und Methode». Band 1, Seite 375), durchaus Denkanstösse sein.

Hans Heinrich Bosshard

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/3: 163–181

Die Weichtiere (Mollusca) des Kantons Zürich: Arteninventar und Gefährdung

Hans Turner, Birmensdorf

Fast 100 Jahre nach dem ersten zürcherischen Molluskenverzeichnis, das etwa 100 valide Arten umfasste, wird seine Neubearbeitung vorgelegt. Gegenwärtig können wir belegen, dass während der letzten zwei Jahrhunderte im Kanton Zürich rund 160 Arten von Weichtieren (106 Landschnekken-, 33 Wasserschnecken- und 21 Muschelarten) angetroffen wurden, das sind 60% der gesamtschweizerisch registrierten Anzahl rezenter Mollusken-Arten. Weitere 13 Arten (vorwiegend Nacktschnecken) dürften im Kanton Zürich bei intensiver Suche noch auffindbar sein. Vermutlich bereits seit längerer Zeit aus dem Kanton Zürich verschwunden sind sechs Arten, die auch gesamtschweizerisch gefährdet erscheinen, und weitere zehn Arten wurden in ZH nur fossil in quartären Ablagerungen gefunden. Zwei Arten, nämlich das Glatte Posthörnchen ***Gyraulus laevis*** und die Bachmuschel ***Unio crassus***, werden als vom Aussterben bedroht eingeschätzt, während acht Arten in die Gefährdungskategorie 2 (stark gefährdet) eingestuft werden müssen. Nicht weniger als 47 weitere Arten erscheinen derzeit wegen Dezimierung und Zerstörung ihrer Habitate oder wegen ihrer Seltenheit gefährdet. Gesamthaft sind bereits rund 40% aller Weichtierarten im Kanton Zürich entweder bereits verschwunden oder sind ernsthaft gefährdet. Separat erwähnt werden acht Adventivarten, von denen nur wenige als eingebürgert betrachtet werden können. In neuerer Zeit sind fünf Arten eingewandert bzw. eingeschleppt worden, die sich durchwegs expansiv verhalten. – Basierend auf der schweizerischen Mollusken-Datenbank werden abschliessend einige Habitate des Kantons Zürich genannt, die wegen des Vorkommens bedrohter oder seltener Arten schützenswert sind.

Inventory and Threat Situation of the Molluscs in the Canton Zurich, Switzerland

Almost 100 years after the first catalogue of the Zurich molluscs, which comprised approximately 100 valid species, its revised edition is presented. During the last two centuries c.160 Recent species of molluscs (106 land snail, 33 frehwater snail and 21 bivalve species) were recorded in the canton Zurich, i.e. 60% of the number of Recent molluscs species in all-Switzerland. It is likely that 13 additional species (mainly slugs) may be detected through intense search. Six species are supposed to have disappeared from the canton Zurich since a prolonged period, and ten additional species could only be detected as fossils in deposits of the Quartenary. ***Gyraulus laevis*** and ***Unio crassus*** are rated to be in danger of extinction (threat-category 1), whereas eight species must be classified as strongly threatened (threat-category 2). No less than 47 additional species appear to be threatened due to decline and destruction of their habitats or due to their rarity (threat-categories 3 and 4). Altogether, 40% of the mollusc species in the canton Zurich either have disappeared or appear to be endangered. Separately treated are eight adventitious species of which only a few became established. Five species immigrated (or were imported) during very recent times and are expanding. – In conclusion, on the basis of the Swiss mollusc data bank some habitats are designated which are in need of protection because of occurrence of threatened or rare species.

1 Einleitung

Die hier vorgelegte Neubearbeitung des zürcherischen Molluskeninventars wurde angeregt durch das «Naturschutz-Gesamtkonzept für den Kanton Zürich» (Claude Meier, in litt. 30.3.1990). Da Mollusken bisher kaum Gegenstand des Naturschutzes waren und diesbezügliche Verbesserungen angestrebt wer-

den, ist es wünschenswert, Kenntnisse über bedeutende Lebensräume gefährdeter Weichtierarten sowie eine Artenliste mit Bezeichnung wichtiger oder gefährdeter Arten zur Verfügung zu stellen. Die vorliegende Veröffentlichung hat daher zunächst den Zweck, Grundlagen für die Ausarbeitung von Naturschutz-Zielsetzungen für die Weichtiere des Kantons Zürich bereitzustellen.

Darüber hinaus ist es wissenschaftlich reizvoll, fast 100 Jahre nach einem ersten zürcherischen Molluskeninventar (H. Suter, 1898) und rund 50 Jahre nach einem zweiten Verzeichnis der beschalten Weichtiere Zürichs (W. Biese, 1937) nachzuforschen, welche faunistischen Veränderungen seither feststellbar sind, welche Arten hinzugekommen sind – sei es, dass sie neu entdeckt wurden oder inzwischen eingewandert sind – und welche Arten inzwischen verschwunden sind. Zugleich hoffe ich, das Interesse einer breiteren Öffentlichkeit für diese vielfach vernachlässigten, missverstandenen und auf Umweltveränderungen teilweise sehr empfindlich reagierenden und daher schutzbedürftigen Geschöpfe zu wecken.

Das erste und das einzige bisher veröffentlichte spezifisch zürcherische Molluskenverzeichnis stammt von Heinrich Suter (1898), dem Ende der 1880er Jahre nach Neuseeland ausgewanderten zürcherischen Malakologen. Dieser bedeutsame Sutersche Katalog beruht auf Aufsammlungen in den 1870er und 1880er Jahren, nennt die Fundorte und umfasst rund 100 valide Arten gemäss heutiger Taxonomie und Systematik, das sind fast 60% des heute bekannten Arteninventars des Kantons Zürich. Besonders wertvoll sind Suters Angaben zur Häufigkeit vieler von ihm gefundener Arten. Wenn er beispielsweise von der zierlichen Zahnlosen Schliessmundschnecke ***Balea perversa*** sagt, sie sei «an Kastanienbäumen, Gessner-Allee, Hirschengraben häufig» (op. cit. Seite 258), so kann der heutige Befund wohl nur ihr gänzliches Verschwinden aus der Stadt und damit eine drastische Verschlechterung der Lebensbedingungen anzeigen. Merkwürdigerweise fehlen in Suters Verzeichnis so auffällige Arten wie ***Viviparus contectus, Pomatias elegans, Planorbarius corneus, Helicella obvia, Cryptomphalus aspersus, Unio pictorum*** etc... Daraus darf geschlossen werden, dass diese auch heute ungewöhnlichen Arten schon damals hier nicht häufig waren.

Ein nicht publizierter Bericht von Walter Biese (1937) beschränkt sich auf die gehäusetragenden Mollusken von Zürich und Umgebung, und er beruht auf «zweijähriger intensiver Sammeltätigkeit» an 22 zürcherischen Lokalitäten, vor allem in und an den Seen der Umgebung Zürichs. Abgesehen von einigen Falschbestimmungen nennt der Katalog Bieses gegenüber Suters Verzeichnis 37 weitere Arten, die teilweise aber bereits von Vorläufern (W. Stoll; G. Bollinger; E. Paravicini, 1916) für Zürich nachgewiesen worden waren. (In der nachfolgenden neuen Gesamtliste der zürcherischen Weichtierarten werden die von Suter genannten Arten mit einem Sternchen *, die von Biese zusätzlich genannten Arten mit einem Pluszeichen + gekennzeichnet.)

Die nachfolgenden Ausführungen gründen im wesentlichen auf eigener Sammeltätigkeit seit 1973 und auf einem auf den Kanton Zürich bezüglichen

Auszug aus der gesamtschweizerischen Mollusken-Datenbank des vom Eidg. Departement des Innern geförderten Projektes «Inventar und Fundortkataster (vorläufiger Verbreitungsatlas) der Mollusken der Schweiz» (H. Turner & J. Rüetschi, 1990) sowie auf der «Roten Liste» der Mollusken der Schweiz (H. Turner et al., 1990).[1]

2 Liste der bisher im Kanton Zürich nachgewiesenen rezenten Weichtierarten in systematischer Ordnung, mit Angabe der Häufigkeit und der Biotop-Präferenz (B) bei allen Arten sowie der Fundorte bei den ungewöhnlichen Arten

GASTROPODA (SCHNECKEN)

COCHLOSTOMATIDAE (Turmdeckelschnecken)
* ***Cochlostoma septemspirale*** (Razoumowsky, 1789), Kleine Walddeckelschnecke. Zerstreute Vorkommen an den nördlichen und westlichen Kantonsgrenzen (bei Kaiserstuhl und Eglisau sowie auf der Lägeren). B: 7.

VIVPARIDAE (Sumpfdeckelschnecken)
\+ ***Viviparus contectus*** (Millet, 1813), Spitze Sumpfdeckelschnecke. Sehr selten (Zürich; vgl. Kap. 5.2). B: 11.
\+ ***Viviparus ater*** (Cristofori & Jan, 1832), Italienische Sumpfdeckelschnecke. Zerstreut (Greifensee, Hochrhein, Zürichsee). B: 12, 13.

VALVATIDAE (Federkiemenschnecken)
\+ ***Valvata cristata*** O.F. Müller, 1774, Flache Federkiemenschnecke. Zerstreut. B: 11.
* ***Valvata alpestris*** Küster, 1853, Alpen-Federkiemenschnecke. Häufig. B: 12, 13.
* ***Valvata piscinalis*** (O.F. Müller, 1774), Gemeine Federkiemenschnecke. Häufig. B: 12, 13.

POMATIASIDAE (Landdeckelschnecken)
Pomatias elegans (O. F. Müller, 1774), Schöne Landdeckelschnecke. Sehr selten (Eglisau, Tössegg, Ellikon; vgl. Kap. 5.2). B: 3.

HYDROBIIDAE (Binnen-Zwergdeckelschnecken)
Potamopyrgus antipodarum (Gray, 1843), Neuseeländische Zwergdeckelschnecke. Expansiver Neuzuwanderer (gemein im Zürichsee; Hochrhein). B: 12.

BITHYNIIDAE (Schnauzenschnecken)
\+ ***Bithynia leachii*** (Sheppard, 1823), Bauchige Schnauzenschnecke. Selten (Greifensee, Hochrhein, Zürichsee). B: 11.
* ***Bithynia tentaculata*** (Linnaeus, 1758), Gemeine Schnauzenschnecke. Häufig. B: 12.

ACICULIDAE (Nadelschnecken)
\+ ***Acicula lineata*** ((Draparnaud, 1801), Gestreifte Nadelschnecke. Zerstreut. B: 6.
* ***Platyla polita*** (Hartmann, 1840), Glatte Nadelschnecke. Selten gefunden (Albis, Greifensee). B: 6.

[1] Für manche Hilfeleistung, besonders bei Revisionen zweifelhafter Belege, danke ich Frau Trudi Meier (Zoolog. Museum der Universität Zürich) sehr herzlich. Meinem Mitarbeiter Jörg Rüetschi (Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf ZH) sowie meinem Freund und Fachkollegen Max Wüthrich (Boll BE) schulde ich Dank für mannigfache Unterstützung. Die drei genannten Malakologen haben auch den Manuskript-Entwurf kritisch gelesen.

CARYCHIIDAE (Zwerghornschnecken)
* ***Carychium minimum*** O. F. Müller, 1774, Bauchige Zwerghornschnecke. Häufig. B: 9.
\+ ***Carychium tridentatum*** (Risso, 1826), Schlanke Zwerghornschnecke. Häufig. B: 8.

ACROLOXIDAE (Teichnapfschnecken)
* ***Acroloxus lacustris*** (Linnaeus, 1758), Teichnapfschnecke. Selten (Au-See, Greifensee, Horgen, Zürich, Zürichberg). B: 11.

PHYSIDAE (Blasenschnecken)
* ***Physa fontinalis*** (Linnaeus, 1758), Quell-Blasenschnecke. Sehr selten (ältere Nachweise: Greifensee, Pfäffikersee, Limmat, Zürichsee; vgl. Kap. 5.2). B: 11.
Physella acuta (Draparnaud, 1805), Spitze Blasenschnecke. Zerstreut (Greifensee, Hochfelden, Horgen, Regensdorf, Thalwil, Zürich). B: 12.
* ***Aplexa hypnorum*** (Linnaeus, 1758), Moos-Blasenschnecke. Zerstreut (Katzensee, Limmat, Pfäffikersee, Türlersee, Zürichsee). B: 10.

PLANORBIDAE (Tellerschnecken)
* ***Ancylus fluviatilis*** O. F. Müller, 1774, Flussnapfschnecke. Zerstreut (Horgen, Kappel a.A., Lindau, Zürich). B: 13.
* ***Planorbis planorbis*** (Linnaeus, 1758), Gemeine Tellerschnecke. Zerstreut. B: 12.
* ***Planorbis carinatus*** O. F. Müller, 1774, Gekielte Tellerschnecke. Zerstreut. B: 12.
\+ ***Anisus leucostoma*** (Millet, 1813), Weissmündige Tellerschnecke. Zerstreut. B: 10.
* ***Anisus (Disculifer) vortex*** (Linnaeus, 1758), Scharfe Tellerschnecke. Sehr selten (Pfäffikersee). B: 11.
* ***Anisus (Disculifer) vorticulus*** (Troschel, 1834), Zierliche Tellerschnecke. Selten (Pfäffikersee, Zürichsee). B: 11.
* ***Bathyomphalus contortus*** (Linnaeus, 1758), Riemen-Tellerschnecke. Zerstreut. B: 11.
* ***Gyraulus albus*** (O. F. Müller, 1774), Weisses Posthörnchen. Häufig. B: 12.
* ***Gyraulus acronicus*** (A. Férussac, 1807), Verbogenes Posthörnchen. Selten (Langnau a.A., Zürich). B: 12.
\+ ***Gyraulus (Torquis) laevis*** (Alder, 1838), Glattes Posthörnchen. Sehr selten, Überleben fraglich (Wädenswil, Zürich). B: 12.
* ***Gyraulus (Armiger) crista*** (Linnaeus, 1758), Zwergposthörnchen. Zerstreut (Greifensee, Pfäffikon, Regensdorf, Zürich). B: 11.
* ***Hippeutis complanatus*** (Linnaeus, 1758), Linsenförmige Tellerschnecke. Zerstreut – ziemlich selten (Aeugst, Dietikon, Greifensee, Zürich). B: 11.
* ***Segmentina nitida*** (O. F. Müller, 1774), Glänzende Tellerschnecke. Zerstreut. B: 11.
\+ ***Planorbarius corneus*** (Linnaeus, 1758), Posthornschnecke. Ziemlich selten (Greifensee, Pfäffikersee, Katzensee, Schwerzenbach, Zürich). B: 11.

LYMNAEIDAE (Schlammschnecken)
* ***Lymnaea stagnalis*** (Linnaeus, 1758), Spitzhornschnecke. Häufig. B: 12.
* ***Lymnaea corvus*** (Gmelin, 1791), Raben-Sumpfschnecke. Zerstreut. B: 11.
? ***Stagnicola turricula*** (Held, 1836), Schlanke Sumpfschnecke. Zerstreut. Identität fraglich. B: 11.
* ***Galba truncatula*** (O. F. Müller, 1774), Kleine Sumpfschnecke. Häufig. B: 10.
\+ ***Radix ampla*** (Hartmann, 1821), Weitmündige Schlammschnecke. Selten geworden. B: 12
: ***Radix auricularia*** (Linnaeus, 1758), Ohrschlammschnecke. Zerstreut. B: 12.
Radix ovata (Draparnaud, 1805), Eiförmige Schlammschnecke. Häufig. B: 12.
eregra (O. F. Müller, 1774), Gemeine Schlammschnecke. Häufig. B: 11.

OPIDAE (Glattschnecken)
opa lubrica (O. F. Müller, 1774), Gemeine Glattschnecke. Gemein. B: 8.
lubricella (Porro, 1838), Kleine Glattschnecke. Zerstreut (Dietikon, Horgen, Lang-inau, Schlieren, Zürich). B: 1.

PYRAMIDULIDAE (Pyramidenschnecken)

* ***Pyramidula rupestris*** (Draparnaud, 1801), Felsen-Pyramidenschnecke. Zerstreut (an Nagelfluhfelsen des Uetlibergs und bei Hütten). B: 5.

VERTIGINIDAE (Windelschnecken)

+ ***Columella edentula*** (Draparnaud, 1805), Zahnlose Windelschnecke. Zerstreut. B: 9.
Truncatellina cylindrica (A. Férussac, 1807), Zylinderwindelschnecke. Selten gefunden (Hausen a.A., Rifferswil, Zürich). B: 1.
+ ***Vertigo pusilla*** O. F. Müller, 1774, Linksgewundene Windelschnecke. Selten (Zürich). B: 2, 3.
* ***Vertigo antivertigo*** (Draparnaud, 1801), Sumpfwindelschnecke. Häufig. B: 9.
Vertigo substriata (Jeffreys, 1833), Gestreifte Windelschnecke. Zerstreut (Hausen a.A., Horgen, Langnau a.A., Oberrieden, Regensberg, Thalwil). B: 9.
* ***Vertigo pygmaea*** (Draparnaud, 1801), Gemeine Windelschnecke. Häufig. B: 1.
+ ***Vertigo moulinsiana*** (Dupuy, 1849), Bauchige Windelschnecke. Selten (Dübendorf, Pfäffikon, Regensdorf). B: 9.
+ ***Vertigo alpestris*** Alder, 1838, Alpenwindelschnecke. Selten (Hausen a.A., Zürich). B: 3, 7.
+ ***Vertigo (Vertilla) angustior*** Jeffreys, 1830, Schmale Windelschnecke. Zerstreut (Dietikon, Dübendorf, Langnau a.A., Pfäffikon, Schlieren, Winterthur, Zürich). B: 9.

CHONDRINIDAE (Kornschnecken)

* ***Granaria frumentum*** (Draparnaud, 1801), Wulstige Kornschnecke. Ziemlich selten (Boppelsen, Eglisau, Elgg, Otelfingen, Rheinau, Zürich-Trichtenhausen). B: 1, 2.
* ***Abida secale*** (Draparnaud, 1801), Roggenkornschnecke. Häufig. B: 2, 3.
* ***Chondrina avenacea*** (Bruguière, 1792), Haferkornschnecke. Selten (Uetliberg). B: 2.

ORCULIDAE (Fässchenschnecken)

* ***Orcula dolium*** (Draparnaud, 1801), Grosse Fässchenschnecke. Ziemlich selten (Aeugst, Eglisau, Hausen a.A., Langnau a.A., Zürich). B: 7.

PUPILLIDAE (Puppenschnecken)

* ***Pupilla muscorum*** (Linnaeus, 1758), Moospuppenschnecke. Zerstreut. B: 1, 2.

VALLONIIDAE (Grasschnecken)

* ***Vallonia costata*** (O. F. Müller, 1774), Gerippte Grasschnecke. Häufig. B: 1.
* ***Vallonia pulchella*** (O. F. Müller, 1774), Glatte Grasschnecke. Häufig. B: 9.
Vallonia excentrica Sterki, 1893, Schiefe Grasschnecke. Selten (Hausen a.A., Zürich). B: 4.
+ ***Acanthinula aculeata*** (O. F. Müller, 1774), Stachelschnecke. Zerstreut. B: 6.

BULIMINIDAE (Vielfrassschnecken)

* ***Ena montana*** (Draparnaud, 1801), Berg-Vielfrassschnecke. Häufig. B: 6.
* ***Merdigera obscura*** (O. F. Müller, 1774), Kleine Vielfrassschnecke. Häufig. B: 6.
* ***Zebrina detrita*** (O. F. Müller, 1774), Weisse Vielfrassschnecke (Märzenschnecke). Zerstreut (Egg, Eglisau, Freienstein-Teufen, Glattfelden, Rheinau, Wasterkingen, Wil, Zürich). B: 1, 2.

CLAUSILIIDAE (Schliessmundschnecken)

* ***Cochlodina laminata*** (Montagu, 1803), Glatte Schliessmundschnecke. Gemein. B: 6.
+ ***Cochlodina fimbriata*** (Rossmässler, 1835), Bleiche Schliessmundschnecke. Zerstreut (Elgg, Freienstein-Teufen, Hausen a.A., Horgen, Hütten, Langnau a.A., Mettmenstetten, Zürich). B: 6.
* ***Cochlodina (Paracochlodina) orthostoma*** (Menke, 1830), Geradmund-Schliessmundschnekke. Ziemlich selten (Aeugst, Hausen a.A., Langnau a.A., Zürich-Uetliberg). B: 6, 7.
+ ***Charpentieria (Itala) itala*** (Martens, 1824), Italienische Schliessmundschnecke. Selten (Regensberg, Uster, Zürich). B: 7.
* ***Macrogastra ventricosa*** (Draparnaud, 1801), Bauchige Schliessmundschnecke. Zerstreut. B: 6, 7.
* ***Macrogastra attenuata lineolata*** (Held, 1836), Mittlere Schliessmundschnecke. Häufig. B: 6, 7.
* ***Macrogastra plicatula*** (Draparnaud, 1801), Gefältelte Schliessmundschnecke. Gemein. B: 6, 7.

* ***Clausilia rugosa parvula*** (A. Férussac, 1807). Kleine Schliessmundschnecke. Zerstreut. B: 7.
* ***Clausilia cruciata*** (Studer, 1820). Scharfgerippte Schliessmundschnecke. Ziemlich häufig. B: 6.
* ***Clausilia (Andraea) dubia*** Draparnaud, 1805. Gitterstreifige Schliessmundschnecke. Zerstreut. B: 6, 7.
+ ***Neostyriaca corynodes*** (Held, 1836). Kalkfelsen-Schliessmundschnecke. Selten (Fischenthal, Herrliberg, Rüti, Zürich). B: 5.
* ***Laciniaria plicata*** (Draparnaud, 1801). Faltenrandige Schliessmundschnecke. Häufig. B: 5.
+ ***Balea (Alinda) biplicata*** (Montagu, 1803). Gemeine Schliessmundschnecke. Ziemlich selten (Herrliberg, Küsnacht, Langnau a.A., Maur, Meilen, Zumikon, Zürich-Wehrenbach). B: 5, 6.
* ***Balea perversa*** (Linnaeus, 1758). Zahnlose Schliessmundschnecke. Zerstreut (Elgg, Hütten, Küsnacht, Langnau a.A., Mettmenstetten, Wädenswil, Winterthur, Zürich). B: 2, 5.

SUCCINEIDAE (Bernsteinschnecken)
* ***Succinella oblonga*** (Draparnaud, 1801). Kleine Bernsteinschnecke. Häufig. B: 9.
* ***Succinea putris*** (Linnaeus, 1758). Gemeine Bernsteinschnecke. Häufig. B: 9.
* ***Oxyloma elegans*** (Risso, 1826). Schlanke Bernsteinschnecke. Häufig. B: 11.

FERUSSACIIDAE (Bodenschnecken)
* ***Cecilioides acicula*** (O. F. Müller, 1774). Gemeine Blindschnecke. Zerstreut (Dübendorf, Greifensee, Hausen a.A., Horgen, Regensberg, Zürich). B: 4, 5.

PUNCTIDAE (Punktschnecken)
* ***Punctum pygmaeum*** (Draparnaud, 1801). Punktschnecke. Gemein. B: 6.

DISCIDAE (Schüsselschnecken)
* ***Discus rotundatus*** (O. F. Müller, 1774). Gefleckte Schüsselschnecke. Gemein. B: 6.

GASTRODONTIDAE (Dolchschnecken)
* ***Zonitoides nitidus*** (O. F. Müller, 1774). Glänzende Dolchschnecke. Häufig. B: 8, 9.
Zonitoides arboreus (Say, 1816). Gewächshaus-Dolchschnecke. Ein einziger Zufallsfund (Regensdorf). B: 15.

EUCONULIDAE (Kegelchen)
* ***Euconulus fulvus*** (O. F. Müller, 1774). Helles Kegelchen. Häufig. B: 6.
+ ***Euconulus alderi*** (Gray, 1840). Dunkles Kegelchen. Zerstreut (Au, Dietikon, Greifensee, Pfäffikersee, Sihlwald, Thalwil, Weiningen, Zürich). B: 9.

VITRINIDAE (Glasschnecken)
* ***Vitrina pellucida*** (O. F. Müller, 1774). Kugelige Glasschnecke. Zerstreut. B: 4, 6.
* ***Eucobresia diaphana*** (Draparnaud, 1805). Ohrförmige Glasschnecke. Zerstreut. B: 6.

ZONITIDAE (Glanzschnecken)
* ***Vitrea diaphana*** (Studer, 1820). Ungenabelte Kristallschnecke. Zerstreut. B: 7.
+ ***Vitrea (Subrimatus) subrimata*** (Reinhardt, 1871). Enggenabelte Kristallschnecke. Zerstreut. B: 7.
* ***Vitrea (Crystallus) crystallina*** (O. F. Müller, 1774). Gemeine Kristallschnecke. Häufig. B: 9.
Vitrea (Crystallus) contracta (Westerlund, 1871). Weitgenabelte Kristallschnecke. Selten (Aeugst, Horgen, Zürich). B: 7.
* ***Aegopinella pura*** (Alder, 1830). Kleine Wachsschnecke. Zerstreut. B: 6.
* ***Aegopinella nitens*** (Michaud, 1831). Weitmündige Wachsschnecke. Gemein. B: 6.
+ ***Perpolita hammonis*** (Ström, 1765). Braune Streifenglanzschnecke. Zerstreut. B: 8, 9.
? ***Perpolita petronella*** (L. Pfeiffer, 1853). Weisse Streifenglanzschnecke. Sehr selten (Erlenmoos Gde. Thalwil). Identität unsicher. B: 6, 8.
Oxychilus (Ortizius) alliarius (Miller, 1822). Knoblauchglanzschnecke. Selten (Sternenberg, Wädenswil, Zürich). B: 6.
Oxychilus cellarius (O. F. Muller, 1774). Kellerglanzschnecke. Zerstreut. B: 5, 6.

* ***Oxychilus draparnaudi*** (Beck, 1837), Grosse Glanzschnecke. Zerstreut. B: 15.
+ ***Oxychilus (Morlina) glaber*** (Rossmässler, 1835), Glatte Glanzschnecke. Selten (Aeugst, Eglisau, Zürich). B: 6.
+ ***Oxychilus (Riedelius) depressus*** (Sterki, 1880), Flache Glanzschnecke. Zerstreut (Aeugst, Dübendorf, Greifensee, Küsnacht, Pfäffikon, Wädenswil, Zürich). B: 6.

DAUDEBARDIIDAE (Daudebardien)
Daudebardia brevipes (Draparnaud, 1805), Kleine Daudebardie. Sehr selten (Freienstein–Teufen). B: 6, 8.

MILACIDAE (Kielnacktschnecken)
Tandonia budapestensis (Hazay, 1881), Boden-Kielschnegel. Wenig bekannt (Zürich). B: 15.

LIMACIDAE (Grossschnegel)
* ***Limax maximus*** Linnaeus, 1758, Grosser Schnegel. Zerstreut (Aeugst, Eglisau, Zürichberg; auch in Gärten nicht selten). B: 6, 15.
* ***Limax cinereoniger*** Wolf, 1803, Schwarzer Schnegel. Zerstreut (Freienstein–Teufen, Langnau a. A., Sihlwald, um Zürich). B: 6.
Malacolimax tenellus (O. F. Müller, 1774), Pilzschnegel. Zerstreut (stellenweise häufig, so am Zürichberg). B: 6.
Lehmannia marginata (O. F. Müller, 1774), Baumschnegel. Wenig bekannt (Halbinsel Au, Hinwil). B: 6.
Lehmannia valentiana (A. Férussac, 1823), Gewächshausschnegel. Ein einziger Zufallsfund (Wädenswil). B: 15.

BOETTGERILLIDAE (Wurmschnegel)
Boettgerilla pallens Simroth, 1912, Wurmschnegel. Zerstreut (wahrscheinlich häufiger als bisher bekannt). B: 8, 15.

AGRIOLIMACIDAE (Kleinschnegel)
Deroceras laeve (O. F. Müller, 1774), Wasserschnegel. Zerstreut. B: 9.
* ***Deroceras (Chorolimax) agreste*** (Linnaeus, 1758), Einfarbige Ackerschnecke. Zerstreut (besonders in montanen Lagen). B: 4, 9.
Deroceras (Agriolimax) reticulatum (O. F. Müller, 1774), Genetzte Ackerschnecke. Gemein (Acker- und Gartenschädling). B: 15.

ARIONIDAE (Wegschnecken)
* ***Arion rufus*** (Linnaeus, 1758), Grosse Rote Wegschnecke. Zurückgehend, nur noch stellenweise häufig. B: 4, 6.
Arion lusitanicus Mabille, 1868, Spanische Wegschnecke. Gemein (expansiver Garten- und Ackerschädling). B: 15.
Arion (Mesarion) subfuscus (Draparnaud, 1805), Braungestreifte Wegschnecke. Häufig. B: 4, 6.
* ***Arion (Kobeltia) distinctus*** Mabille, 1868, Gemeine Garten-Wegschnecke. Häufig. B: 15.
Arion (Carinarion) silvaticus Lohmander, 1937, Wald-Wegschnecke. Häufig (um Zürich, Sihlwald; weitere Verbreitung ungenügend bekannt). B: 6.
Arion (Microarion) intermedius Normand, 1852, Igel-Wegschnecke. Verbreitung noch wenig bekannt (Langnau a. A.). B: 4, 6.

BRADYBAENIDAE (Strauchschnecken)
* ***Fruticicola fruticum*** (O. F. Müller, 1774), Genabelte Strauchschnecke. Häufig. B: 3.

HYGROMIIDAE (Laubschnecken)
? ***Trichia hispida*** (Linnaeus, 1758), Gemeine Haarschnecke. Selten. Rezentes Vorkommen in ZH fraglich. B: 4.
* ***Trichia sericea*** (Draparnaud, 1801), Seidenhaarschnecke. Gemein. B: 6.
? ***Trichia montana*** (Studer, 1820), Jurassische Haarschnecke. Vorkommen in ZH fraglich. B: 7.
* ***Trichia clandestina*** (Hartmann, 1821), Aufgeblasene Haarschnecke. Ziemlich häufig. B: 15.

* ***Trichia villosa*** (Draparnaud, 1805), Zottige Haarschnecke. Häufig. B: 6.
Petasina unidentata (Draparnaud, 1805), Einzähnige Haarschnecke. Sehr selten (Eglisau). B: 6.
* ***Petasina (Edentiella) edentula*** (Draparnaud, 1805), Zahnlose Haarschnecke. Zerstreut. B: 6.
* ***Candidula unifasciata*** (Poiret, 1801), Quendelschnecke. Selten (Glattfelden, Hüntwangen, Rheinau, Wil, Zürich). B: 2.
+ ***Xerolenta obvia*** (Menke, 1828), Weisse Heideschnecke. Ziemlich selten (Affoltern a. A., Greifensee, Hüntwangen, Küsnacht, Schlieren, Zürich). B: 1.
* ***Helicella itala*** (Linnaeus, 1758), Westliche Heideschnecke. Zerstreut. B: 1.
* ***Monachoides incarnatus*** (O. F. Müller, 1774), Rötliche Laubschnecke (Inkarnatschnecke). Gemein. B: 6, 8.
Hygromia cinctella (Draparnaud, 1801), Kantige Laubschnecke. Zerstreut (Küsnacht, Meilen, Obfelden, Uitikon, Zürich). B: 3, 15.
+ ***Monacha cartusiana*** (O. F. Müller, 1774), Kartäuserschnecke. Selten (Birmensdorf, Volketswil, Zürich). B: 3, 4.
* ***Helicodonta obvoluta*** (O. F. Müller, 1774), Riemenschnecke. Häufig. B: 3, 6.

HELICIDAE (Schnirkelschnecken)
* ***Arianta arbustorum*** (Linnaeus, 1758), Gefleckte Schnirkelschnecke. Gemein. B: 4, 6.
* ***Helicigona lapicida*** (Linnaeus, 1758), Steinpicker. Zerstreut. B: 5.
* ***Isognomostoma isognomostomos*** (Schröter, 1784), Maskenschnecke. Häufig. B: 6.
* ***Cepaea nemoralis*** (Linnaeus, 1758), Schwarzmündige Bänderschnecke. Gemein. B: 3, 6.
* ***Cepaea hortensis*** (O. F. Müller, 1774), Weissmündige Bänderschnecke. Häufig. B: 4, 6.
* ***Cepaea (Austrotachea) sylvatica*** (Draparnaud, 1801), Fleckenstreifige Bänderschnecke. Sehr selten (Laufen-Uhwiesen, Rheinau). B: 4, 6.
+ ***Cryptomphalus aspersus*** (O. F. Müller, 1774), Gefleckte Weinbergschnecke (Chagrinschnekke). Selten (Wädenswil, Zürich). B: 3, 15.
* ***Helix pomatia*** Linnaeus, 1758, Weinbergschnecke. Ziemlich häufig. B: 3.

BIVALVIA (Muscheln)

UNIONIDAE (Najaden, Fluss- und Teichmuscheln)
* ***Unio (Crassunio) crassus*** Philipsson, 1788, Bachmuschel (Gemeine Flussmuschel). Stark zurückgehend (vgl. Kap. 5.1). B: 13.
+ ***Unio pictorum*** (Linnaeus, 1758), Malermuschel. Selten (Erlenbach, Greifensee, Hausen a. A., Zürich). B: 12.
* ***Anodonta cygnea*** (Linnaeus, 1758), Schwanenmuschel (Grosse Teichmuschel). Häufig. B: 12.
+ ***Anodonta anatina*** (Linnaeus, 1758), Entenmuschel (Flache Teichmuschel). Selten (Regensdorf, Wädenswil, Zürich). B: 12.

SPHAERIIDAE (Kugel- und Erbsenmuscheln)
* ***Sphaerium corneum*** (Linnaeus, 1758), Gemeine Kugelmuschel. Zerstreut. B: 12.
* ***Musculium lacustre*** (O. F. Müller, 1774), Häubchenmuschel. Zerstreut. B: 9, 12.
+ ***Pisidium amnicum*** (O. F. Müller, 1774), Grosse Erbsenmuschel. Ziemlich selten (Greifensee, Langnau a. A., Pfäffikon, Wädenswil, Zürich). B: 12, 13.
* ***Pisidium casertanum*** (Poli, 1791), Gemeine Erbsenmuschel. Häufig. B: 12, 13.
Pisidium conventus Clessin, 1877, See-Erbsenmuschel. Selten (Erlenbach, Zürich). B: 12.
* ***Pisidium henslowanum*** (Sheppard, 1823), Kleine Faltenerbsenmuschel. Lokal häufig (Zürichsee). B: 12, 13.
+ ***Pisidium hibernicum*** Westerlund, 1894, Glatte Erbsenmuschel. Lokal häufig (Zürichsee, Greifensee). B: 12, 13.
* ***Pisidium lilljeborgii*** Clessin, 1886, Kreisrunde Erbsenmuschel. Selten (Zürich). B: 12.
* ***Pisidium milium*** Held, 1836, Eckige Erbsenmuschel. Zerstreut (Greifensee, Katzensee, Zürichsee). B: 9, 11.
Pisidium moitessierianum Paladilhe, 1866, Winzige Falten-Erbsenmuschel. Lokal häufig (Zürichsee). B: 12, 13.

* ***Pisidium nitidum*** Jenyns, 1832, Glänzende Erbsenmuschel. Lokal häufig (Katzensee, Zürichsee; fossil bei Zell). B: 12, 13.
Pisidium obtusale (Lamarck, 1818), Stumpfe Erbsenmuschel. Zerstreut (Greifensee, Katzensee, Limmat-Altwasser, Pfäffikersee). B: 9, 11.
+ ***Pisidium personatum*** Malm, 1855, Zerstreut (Greifensee, Katzensee, Zürichsee). B: 12, 13.
Pisidium pulchellum Jenyns, 1832, Schöne Erbsenmuschel. Selten (Zürichsee). B: 9.
+ ***Pisidium subtruncatum*** Malm, 1855, Schiefe Erbsenmuschel. Lokal häufig (Greifensee, Katzensee, Pfäffikersee, Zürichsee). B: 12, 13.
Pisidium tenuilineatum Stelfox, 1918, Kleinste Erbsenmuschel. Zerstreut (Zürichsee). B: 12, 13.

DREISSENIDAE (Dreikantmuscheln)
Dreissena polymorpha (Pallas, 1771), Wandermuschel. Häufig. B: 12, 13.

* kennzeichnet Arten, die bereits im Verzeichnis von H. Suter (1898) – allerdings teilweise unter anderen Namen (Synonyma) – erwähnt werden
+ kennzeichnet Arten, die zusätzlich im Verzeichnis von W. Biese (1937) – teilweise ebenfalls unter Synonymen – genannt werden
? kennzeichnet Arten, deren Vorkommen im Kanton Zürich zweifelhaft oder deren Identität fraglich ist
B gibt die Präferenz der Art für Biotop-Typen (1–15) an:
1 Xerotherme offene Standorte, Halbtrockenrasen, Geröll
2 Felsensteppe (offene warm-trockene Felsen)
3 Lichter warm-trockener Wald, Hecken, Gebüsche, Waldränder
4 Mittelfeuchtes offenes Land, Wiesen
5 Mittelfeuchter Fels, Schluchten, Mauern
6 Mittelfeuchter Wald (subalpin: auch Zwergstrauchheide)
7 Felsen und Gesteinsschutt im Wald
8 Auenwald und sumpfiger Wald
9 Sumpf, Flachmoor, nasse Wiese
10 Periodische Kleingewässer
11 Seichte pflanzenreiche Gewässer
12 Stehende Gewässer (Teiche, Seen)
13 Fliessgewässer
14 Quellen, unterirdische Gewässer
15 Garten, Acker, landwirtschaftliche Intensivkultur

2.1 Erläuterungen zur Nomenklatur

Die Nomenklatur berücksichtigt neben den Standardwerken von M.P. Kerney et al. (1983) und P. Glöer et al. (1986) verschiedene systematisch-taxonomische Neuerungen aufgrund der Arbeiten und auch persönlicher Mitteilungen durch Hartmut Nordsieck, Gerhard Falkner (siehe auch R. Fechter & G. Falkner, 1990) und Claus Meier-Brook.

Die deutschen Artnamen folgen grösstenteils der Zusammenstellung von J.H. Jungbluth (1985), aber für eine Reihe von Arten wurden besser kennzeichnende deutsche Namen eingeführt, teils eigene Prägungen, teils solche von G. Falkner.

2.2 Bemerkung zu den genannten Fundorten

Die bei den ungewöhnlichen Arten genannten Lokalitäten beziehen sich auf die in den Sammlungen vorliegenden Belegexemplare. Da diese grossenteils älteren Datums sind, besteht keine Gewähr, dass die betreffenden Arten heute noch an den gleichen Orten vorkommen (z. B. *Balea perversa* in der Stadt Zürich, Belege nur aus dem 19. Jahrhundert). Der in Vorbereitung befindliche Verbreitungsatlas der Mollusken der Schweiz wird daher differenzieren zwischen Funden a) vor 1900, b) zwischen 1900 und 1950, c) nach 1950. In der Liste der schützenswerten Habitate (Kap. 8) werden bei den gefährdeten Arten soweit wie möglich die Fundjahre genannt.

2.3 Fehlmeldungen und zweifelhafte Vorkommen

Die Gelippte Tellerschnecke *Anisus spirorbis* wurde vom namhaften Malakologen A. Mousson durch so etikettierte Exemplare vom Uetlibergsumpf belegt, aber Nachprüfungen haben ergeben, dass es sich wahrscheinlich um juvenile und teils etwas abweichend gebildete Formen von *Anisus leucostoma* handelt. Das gleiche gilt für W. Bieses (1937) «*Paraspira* cf. *spirorbis* L.» vom Limmat-Altwasser bei Schlieren. Demgemäss fehlt *A. spirorbis*, eine von führenden Malakologen unterschiedlich aufgefasste Art, in diesem Verzeichnis.

Die Identität der bereits von H. Suter (1898) genannten Schlammschnekkenart *Stagnicola turricula* beruht vorläufig nur auf gehäusemorphologischen Merkmalen und bedarf der Bestätigung durch anatomische Untersuchungen. Andererseits handelt es sich bei manchen «*L. corvus*» eventuell um *Lymnaea vulnerata* Küster, 1862 (M. Jackiewicz & J. Gerber, 1990).

Von der sehr seltenen Grossen Grasschnecke *Vallonia declivis* Sterki, 1892 wurden unter dem Synonym «*V. costata adela* Westerlund» von W. Biese (1937) Vorkommen bei Dietikon und Schlieren gemeldet, die Nachprüfung durch M. Wüthrich (1990) ergab jedoch, dass es sich um juvenile Schalen von *Vallonia pulchella* handelt.

Ebenso auf Falschbestimmungen beruhen die Angaben W. Bieses (1937) für «*Retinella nitidula* Drap.» (recte: *Aegopinella nitens* Michaud), «*Vitrinopugio elongatus* Drap.» (= Synonym für *Semilimax semilimax* Férussac; recte: *Eucobresia diaphana* Drap.) und «*Laciniaria cana* Held» (recte: *Laciniaria plicata* Drap.). «*Patula ruderata* Stud.» vom Kohlfirst bei Flurlingen in der Mousson-Sammlung wurde als der gemeine *Discus rotundatus* (O.F. Müller) identifiziert.

Die schon von H. Suter (1898) gemeldete Gartenwegschnecke «*Arion hortensis* Fér.» ist nach heutigem Artverständnis *Arion (Kobeltia) distinctus* Mabille, 1868; der echte *Arion hortensis* Férussac, 1819, ist westeuropäisch, und sein Areal berührt die Schweiz nur im westlichsten Landesteil.

Das fragliche Vorkommen von *Perpolita petronella* beruht auf einem einzigen, nicht sicher bestimmten Exemplar vom Sihlwald (rechts der Sihl, Gmde. Thalwil).

Als zweifelhaft erscheint im Arteninventar die Jurassische Haarschnecke *Trichia montana*. Die meisten der so etikettierten zürcherischen Exemplare in den Sammlungen haben sich entweder als haarlose Formen von *Trichia villosa* oder als *Trichia clandestina* erwiesen. Da aber die echte *Trichia montana* aus dem Jura in die Lägeren-Kette sporadisch übergreift, wird diese Art bis zur definitiven Bestätigung mit Vorbehalt zum kantonalzürcherischen Arteninventar gezählt.

Ebenfalls zweifelhaft ist ein rezentes zürcherisches Vorkommen von *Trichia hispida*, denn bisherige Revisionen so etikettierter Belegexemplare haben ergeben, dass es sich um *Trichia sericea* handelt. Jedoch ist *T. hispida* in ZH verschiedentlich fossil belegt (Kap.4). Ob neben *T. sericea* auch *Trichia plebeia* (Draparnaud) in ZH vorkommt, bedarf noch näherer Abklärungen.

3 Im Kanton Zürich vermutlich vorkommende, aber noch nicht nachgewiesene Weichtierarten

Die nachfolgend genannten unauffälligen, verborgen lebenden oder schwierig identifizierbaren Arten können wenigstens teilweise sicher nachgewiesen werden, sobald intensiv und gezielt nach ihnen gesucht wird:

Ferrissia wautieri (Mirolli, 1960), Flache Mützenschnecke
Truncatellina monodon (Held, 1837), Rotbraune Zylinderwindelschnecke
Pupilla triplicata (Studer, 1820), Dreizähnige Puppenschnecke
Pupilla sterrii (Voith, 1838), Gestreifte Puppenschnecke
Helicodiscus singleyanus (Pilsbry, 1890), Scheibchenschnecke
Arion (Carinarion) circumscriptus Johnston, 1828, Graue Wegschnecke
Arion (Carinarion) fasciatus (Nilsson, 1822), Gelbstreifige Wegschnecke
Vitrinobrachium breve (A. Férussac, 1821), Kurze Glasschnecke
Aegopinella minor (Stabile, 1864), Wärmeliebende Wachsschnecke
Daudebardia rufa (Draparnaud, 1805), Rötliche Daudebardie
Deroceras sturanyi (Simroth, 1894), Hammerschnegel
Deroceras rodnae Grossu & Lupu, 1965, Heller Schnegel

4 Im Kanton Zürich vermutlich ausgestorbene Weichtierarten

Hier müssen zunächst sechs wohlbekannte, auffällige Arten genannt werden, bei denen der begründete Verdacht besteht, dass sie bereits vor dem 19. Jahrhundert ausgestorben sind oder ausgerottet wurden. Für diese Arten existieren keine zürcherischen Belege in den Sammlungen, und es sind auch keine auf ZH bezügliche Literaturangaben bekannt. Aber der Verbreitungstyp dieser Arten umfasst im Prinzip auch das zürcherische Kantonsgebiet, zumal ein rezentes Vorkommen in angrenzenden Kantonen auf geeigneten naturbelassenen Standorten belegt werden kann:

Theodoxus fluviatilis (Linnaeus, 1758), Kahnschnecke
Valvata pulchella Studer, 1820, Moor-Federkiemenschnecke

Cochlicopa nitens (Gallenstein, 1848), Glänzende Achatschnecke
Sphyradium doliolum (Bruguière, 1792), Kleine Fässchenschnecke
Chondrula tridens (O. F. Müller, 1774), Dreizahn-Vielfrassschnecke
Pseudanodonta complanata (Rossmässler, 1835), Abgeplattete Teichmuschel

Ein Vorkommen der gesamtschweizerisch vom Aussterben bedrohten Kahnschnecke *Theodoxus fluviatilis* im zürcherischen Einzugsgebiet des Hochrheins (Zürichsee, Limmat, Zugersee etc.) wird von R. Kinzelbach (1987, Abb. 3) für die Zeit vor 1970 angegeben. Da aber entsprechende Belege nicht auffindbar waren und auch von R. Kinzelbach (in litt. 18. Mai 1990) nicht genannt werden konnten, muss jene Darstellung als rein hypothetisch gelten.

Die gesamtschweizerisch ebenfalls vom Aussterben bedrohte Moor-Federkiemenschnecke *Valvata pulchella* wurde irrtümlich vom Hüttnersee gemeldet. Die betreffenden vier Belegexemplare (im Zoologischen Museum der Universität Zürich) wurden als *Valvata alpestris* revidiert. – Angebliche Funde von *V. pulchella* in grosser Zahl im Hochrhein (!) durch B. Koster & J. Winkler (1986) haben sich bei meiner Nachprüfung des von R. Kinzelbach (Zoolog. Inst. d. Techn. Hochsch. Darmstadt) freundlich zur Verfügung gestellten Belegmaterials ebenfalls als *Valvata alpestris* herausgestellt. Da also kein Nachweis von *V. pulchella* im Kanton Zürich bekannt ist, wird diese Art hier als wahrscheinlich ausgestorben betrachtet.

Sodann ist hier auf folgende zehn Arten hinzuweisen, die rezent in ZH noch nicht sicher nachgewiesen wurden, deren früheres (quartäres) Vorkommen aber durch Fossilfunde belegt ist:

Jüngeres Holozän (Lehm bei Kollbrunn im Tösstal; coll. M. Wüthrich):
Vallonia enniensis (Gredler, 1856), Feingerippte Grasschnecke

Postglazial (sandig-tonige Sedimente aus der Jüngeren Dryas-Zeit im Neftenbacher Schotterfeld bei Aesch; U.J. Käser, 1980):
Columella columella (G. v. Martens, 1830), Hohe Windelschnecke
Vertigo «parcedentata», revidiert als *V. genesii* (Gredler, 1856), Blanke Windelschnecke
Trichia hispida (Linnaeus, 1758) (syn. *T. concinna* Jeffreys), Gemeine Haarschnecke

Jungpleistozän/Altholozän (Bölling bis Boreal, Lehmgrube Dättnau bei Winterthur; K.F. Kaiser, 1979):
Eucobresia nivalis (Dumont & Mortillet, 1852), Alm-Glasschnecke
Discus ruderatus (A. Férussac, 1821), Braune Schüsselschnecke

Jungpleistozän (Kalktuff-Zwischenlage der Deckenschotter bei Boppelsen; Jayet, 1950):
Discus ruderatus (A. Férussac, 1821), Braune Schüsselschnecke
Jaminia quadridens (O. F. Müller, 1774), Vierzahn-Vielfrassschnecke

Riss/Würm-Interglazial (Kalktuffe bei Feuerthalen; Forcart, 1963):
Discus perspectivus (Megerle v. Mühlfeld, 1816), Gekielte Schüsselschnecke
Aegopinella ressmanni (Westerlund, 1883), Gegitterte Wachsschnecke
Trichia hispida (Linnaeus, 1758) (syn. *T. concinna* Jeffreys), Gemeine Haarschnecke
Euomphalia strigella (Draparnaud, 1801), Grosse Laubschnecke

Zwei dieser nur fossil aus ZH belegten Arten, nämlich *Discus perspectivus* und *Aegopinella ressmanni* aus dem Riss/Würm-Interglazial, kommen in der ganzen Schweiz gegenwärtig nicht mehr vor, sondern sind ostalpin-osteuropäisch verbreitet.

Die von G. Bollinger (1920) aus interglazialen Schichten bei Dürnten als neu beschriebene Art *Valvata zschokkei* ist wahrscheinlich eine Jugendform von *V. piscinalis antiqua* Morris, 1838.

5 Rote Listen der zürcherischen Weichtierarten

Für die in den Abschnitten 5.1 bis 5.4 aufgelisteten und in die Gefährdungskategorien 1 bis 4 eingestuften Arten ist nicht ein regionalzürcherischer Gefährdungsgrad angegeben, sondern es wurde der gesamtschweizerische Gefährdungsgrad aus der «Roten Liste» (H. Turner et al., 1990) übernommen. Die angewandten und nachfolgend skizzierten Gefährdungskategorien wurden von J. Blab & E. Nowak (1983, 1986) entwickelt.

5.1 Gefährdungskategorie 1 (vom Aussterben bedroht)

Es handelt sich entweder um sogenannt seltene Arten, die nur in Einzelvorkommen oder wenigen isolierten und kleinen Populationen auftreten, oder um Arten, deren Bestände durch lange anhaltenden oder raschen Rückgang auf eine bedrohliche bis kritische Grösse zusammengeschmolzen sind. Für die nachfolgend genannten zwei Arten, *Gyraulus laevis* und *Unio crassus*, sind Schutzmassnahmen dringend notwendig, denn das Überleben dieser Arten in der Schweiz ist unwahrscheinlich, wenn die verursachenden Faktoren weiterhin einwirken oder wenn keine bestandeserhaltenden Massnahmen ergriffen werden. Andererseits können diese Arten als beste Indikatoren für intakte oder zumindest sehr naturnahe gebliebene Biotope gelten.

Gyraulus laevis: Das Glatte Posthörnchen lebt als stenöke Wasserschnecke in ungestörten Verlandungsbereichen sauberer Stillgewässer. Rezent ist es nur aus einem geschlossenen Schilfbestand am Zürichsee-Ufer bei Au (Wädenswil) belegt, wurde aber dort seit mehr als 50 Jahren nicht mehr gefunden.

Unio crassus: Die Bachmuschel ist angewiesen auf saubere, nitratarme Bäche und andere Gewässer mit klarem bewegtem Wasser über sandigem und kiesigem Grund. Diese früher weit verbreitete Art hat im Gefolge der Gewässerverschmutzungen vor allem unseres Jahrhunderts und vermutlich auch wegen der vielen Bachbegradigungen sehr drastische Bestandeseinbussen erlitten und ist aus den meisten ihrer früheren Habitate verschwunden. Nach 1950 ist sie nur noch von wenigen Stellen des Zürichseeufers sowie aus dem Fischbach bei Niederhasli in den Sammlungen dokumentiert.

5.2 Gefährdungskategorie 2 (stark gefährdet)

Arten, die im nahezu gesamten schweizerischen Verbreitungsgebiet gefährdet sind und nur noch kleine oder signifikant zurückgehende Bestände aufweisen oder die regional bereits verschwunden sind. In diese Kategorie fallen acht im Kanton Zürich mit Restbeständen belegte Arten, deren Überleben teilweise bereits fraglich ist. Auch diese Arten können als gute Indikatoren für ungestörte Umweltbedingungen in ihren Habitaten gelten.

Viviparus contectus: War in pflanzenreichen Klein- und Altwässern anscheinend immer schon selten und scheint verschiedentlich durch Aquarienliebhaber ausgesetzt worden zu sein; aus Zürich nur durch zwei Funde («Stadtgraben» Zürich, Plarre leg. 1931; Steuart leg. o.J.) belegt. Überleben fraglich.

Pomatias elegans: Bevorzugt als mediterran-westeuropäische Prosobranchier-Landschnecke trocken-warme, kalkreiche und lockere Böden mit aufgelockerter Vegetation. Die einzigen kantonalzürcherischen Kolonien sind von Eglisau–Tössegg (1915, 1972 etc.) und von Ellikon (1973) dokumentiert.

Physa fontinalis: Diese an klare pflanzenreiche Seichtgewässer gebundene Art scheint ähnlich wie die Bachmuschel ***Unio crassus*** aus den meisten ihrer früheren Habitate verschwunden zu sein; ihre letzten Nachweise datieren von 1915 aus der Limmat bei Schlieren und von 1937 aus dem Greifensee und Pfäffikersee. (Eine Angabe von P. A. Imholz, 1964, für den Zürichsee bei Tiefenbrunnen ist mangels Belegexemplar nicht nachprüfbar; es könnte sich um eine Verwechslung mit ***Physella acuta*** handeln.)

Die Zierliche Tellerschnecke Anisus vorticulus, das Verbogene Posthörnchen ***Gyraulus acronicus*** und die Glänzende Tellerschnecke ***Segmentina nitida*** bewohnen pflanzenreiche Seichtgewässer, die weithin den landwirtschaftlichen «Meliorationen» (Entwässerungen von Riedwiesen und deren Umwandlung in gedüngte Fettwiesen) zum Opfer gefallen sind. Entsprechend selten bis sehr selten sind diese drei Arten geworden.

Die wenigen Vorkommen der Bauchigen Windelschnecke ***Vertigo moulinsiana*** in wassernahen Schilfgürteln erscheinen vor allem durch die intensivierte Nutzung angrenzender Grünflächen stark bedroht, während von der Kleinen Daudebardia ***D. brevipes*** gar nur ein einziges Vorkommen in feuchtem Eschenwald bei Freienstein-Teufen bekannt ist.

5.3 Gefährdungskategorie 3 (gefährdet)

Arten, die in grossen Teilen des schweizerischen Verbreitungsgebietes wegen regional kleiner, lokal vielerorts zurückgehender oder verschwundener Bestände gefährdet sind. Auch stenöke Arten mit engen Bindungen an bestimmte gefährdete Pflanzen oder Biotope. Im Kanton Zürich fallen folgende 21 Arten von Wasser- und Landschnecken sowie Muscheln in diese Kategorie:

Valvata cristata	*Anisus (Disculifer) vortex*	***Granaria frumentum***
Bithynia leachii	*Gyraulus (Arminger) crista*	***Zebrina detrita***
Acroloxus lacustris	*Hippeutis complanatus*	***Deroceras laeve***
Aplexa hypnorum	*Planorbarius corneus*	***Euconulus alderi***
Physella acuta	*Radix ampla*	***Anodonta anatina***
Planorbis carinatus	*Vertigo substriata*	***Unio pictorum***
Anisus leucostoma	*Vertigo (Vertilla) angustior*	***Pisidium amnicum***

Die früher höchst seltene ***Bithynia leachii*** hat ihren Bestand im Zürichsee in den letzten 10 Jahren deutlich vermehrt (H. Trüb, mdl. Mitt.).

5.4 Im Kanton Zürich seltene (hier potentiell gefährdete) Weichtierarten (Gefährdungskategorie 4)

Die Gefährdungskategorie 4 (potentiell gefährdet) wurde eingeführt für Arten, die im Gebiet nur wenige und kleine Vorkommen besitzen, und für Arten, die in kleinen Populationen am Rande ihres Areals leben. Auch Arten dieser Kategorie können durch unvorhergesehene lokale Eingriffe schlagartig ausgerottet werden. Das Symposium «Zehn Jahre Rote Listen» 1988 der «Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie» kam jedoch zum Schluss, dass diese Kategorie gestrichen werden soll. In dieser Übersicht soll sie vorläufig beibehalten werden.

Die nachfolgend genannten 26 Arten sind teils gesamtschweizerisch potentiell gefährdet, anderenteils sind es aber gesamtschweizerisch (noch) nicht gefährdete Arten, die im Kanton Zürich selten sind oder deren Areal gerade noch das zürcherische Kantonsgebiet am Rande berührt. Letzteres trifft zu für *Cochlostoma septemspirale* (Vorkommen an der Lägeren, am Hochrhein östlich von Kaiserstuhl und bei Eglisau/Buchau SH), für *Petasina unidentata* (bei Eglisau) sowie für *Cepaea sylvatica* (am Rheinfall, bei Laufen-Uhwiesen und bei Rheinau):

Cochlostoma septemspirale
Viviparus ater (vgl. Kap. 6)
Platyla polita
Lymnaea corvus
Truncatellina cylindrica
Vertigo antivertigo
Chondrina avenacea
Vallonia excentrica
Perpolita petronella
Oxychilus (Morlina) glaber
Arion (Microarion) intermedius
Charpentieria (Itala) itala (vgl. Kap. 6)
Neostyriaca corynodes
Balea (Alinda) biplicata
Balea perversa
Candidula unifasciata
Helicella itala
Monacha cartusiana (vgl. Kap. 6)
Petasina unidentata
Cepaea (Austrotachea) sylvatica
Musculium lacustre
Pisidium conventus
Pisidium hibernicum
Pisidium lilljeborgii
Pisidium milium
Pisidium pulchellum

6 Adventivarten

Die zürcherische Molluskenliste (Kap. 2) enthält einige Arten, die nicht als bodenständig, sondern als typische Adventivarten gelten. Dabei handelt es sich teilweise um unabsichtlich (z. B. mit Ballenpflanzen aus Gärtnereien oder mit Gemüse aus südlichen Ländern) eingeschleppte, zum anderen Teil auch um absichtlich angesiedelte Tiere. Einige dieser Arten sind von den gemeldeten Fundplätzen bereits wieder verschwunden, aber andere halten sich über Jahrzehnte. Nur wenige eingeschleppte Arten können als eingebürgert betrachtet werden (vor allem *Viviparus ater*, vielleicht auch *Physella acuta* und *Hygromia cinctella*).

Viviparus ater: Von dieser in den norditalienischen (insubrischen) Seen heimischen, grosswüchsigen und lebendgebärenden Sumpfdeckelschnecke wurden von J. Bloch im Jahre 1883 einige Exemplare am Nordende des Zürichsees (Zürichhornbucht) ausgesetzt (W. Roth, 1906).

Diese Art ist inzwischen im Seichtwasser des ganzen Zürichsees heimisch geworden (G. Ribi, 1986), wurde auch im Greifensee gefunden (W. Biese, 1937) und wird seit 1956 auch im Bodensee und Hochrhein nachgewiesen.

Physella acuta: Diese mediterran-westeuropäische Art wurde seit etwa 100 Jahren mit Wasserpflanzen über grosse Teile Europas verbreitet und scheint sich gegenüber Wasserverschmutzung resistenter als die einheimische Quellblasenschnecke *Physa fontinalis* zu verhalten.

Zonitoides arboreus: Diese in Wäldern Nordamerikas gemeine Art wurde 1952 am Katzensee gefunden; es dürfte sich dabei nur um das unbeständige, inzwischen wohl schon wieder erloschene Vorkommen eines Gewächshausflüchtlings handeln.

Lehmannia valentiana: Diese auf der Iberischen Halbinsel heimische Nacktschneckenart ist in Gewächshäusern vieler Länder nicht selten und wurde 1918 bei Wädenswil nachgewiesen.

Charpentieria (Itala) itala: Belegte Vorkommen dieser südalpinen Schliessmundschnecke in Uster (1916), auf der Lägeren (o. J.) und in Zürich-Wehrenbach (1930) sind anscheinend wieder erloschen.

Monacha cartusiana: Einige synanthrope Kolonien dieser mediterran-südosteuropäischen Kartäuserschnecke haben sich unter günstigen mikroklimatischen Bedingungen am Förrlibuck, bei Birmensdorf u. a. o. einige Jahre bis Jahrzehnte gehalten.

Hygromia cinctella: In Gärten des Stadtgebietes von Zürich und in verschiedenen Siedlungen des Kantonsgebietes ist diese mediterrane (auch im Tessin und bei Genf vorkommende) Art nicht selten. In meinem Garten in Obfelden gehört sie (neben *Arion lusitanicus*) seit 10 Jahren zu den häufigsten Schnecken (an Rosen, Rhododendron, Johannisbeersträuchern etc.).

Cryptomphalus aspersus: Zwischen 1909 und 1926 wurde die mediterran-westeuropäische Chagrinschnecke von vier verschiedenen Stellen des Stadtgebietes von Zürich gemeldet, seither ist sie anscheinend wieder verschwunden.

7 Neuzuwanderer

Einige wenige Arten sind mehr oder weniger aktiv, zum Teil aber mit kräftiger Hilfe des Menschen, zugewandert und verhalten sich ausgesprochen expansiv:

Potamopyrgus antipodarum: Die winzige, nur 4 mm messende Neuseeländische Wasser-Deckelschnecke wurde 1977 im Greifensee, 1978 im Neuenburgersee und 1980 im Zürichsee festgestellt (B. Crozet et al., 1980; J. E. Walter, 1980; G. Ribi & H. Arter, 1986); ihre Expansion verläuft, auch wegen parthogenetischer Vermehrung und relativer Indifferenz gegenüber Wasserverschmutzung, in raschem Tempo.

Arion lusitanicus: Die berüchtigte Spanische Wegschnecke ist etwa anfangs der 1950er Jahre aus Westen in die Schweiz zugewandert und wurde erstmals 1963 im Kanton Zürich (Langnau a. A.) gefunden. Sie scheint wegen sehr grosser Vermehrungsrate die ihr morphologisch und ökologisch ähnliche bodenständige Rote Wegschnecke *Arion rufus* aus dem Kulturgelände in die Wälder zu verdrängen und ihr dorthin nachzufolgen (G. Schmid, 1979).

Tandonia budapestensis: Ein wahrscheinlich vorwiegend durch den Menschen verbreiteter Gartenschädling. Erstnachweis für die Schweiz: Basel, vor 1935 (leg. et det. L. Forcart). Erstnachweis ZH: Zürich, Toblerstrasse, 1954 (leg. A. Grossmann, det. L. Forcart). Inzwischen auch am Zürichberg gefunden.

Boettgerilla pallens: Die Wurmnacktschnecke wurde erstmals 1962 für Deutschland und in der Folge für viele andere Gebiete Mitteleuropas gemeldet. Erstnachweis für die Schweiz: Adliswil, 1969 (leg. E. Urmi, det. H. Jungen). Im Kanton Zürich ist die Art gegenwärtig in feuchten Wäldern (z. B. Buchen-Eschenwälder) sowie im Kulturgelände nicht selten zu finden.

Dreissena polymorpha: Die Wandermuschel wurde seit Anfang des 19. Jahrhunderts aus dem kaspischen Raum innerhalb weniger Jahrzehnte passiv vor allem durch die Binnenschiffahrt über grosse Teile Europas verbreitet und erreichte bereits um 1850 den Oberrhein vor den Toren Basels. Es ist ein Rätsel, weshalb die Invasion der Schweiz erst 100 Jahre später, anfangs der 1960er Jahre, begann; ausgehend vom Bodensee (1961) und Genfersee (1962) wurden dann allerdings in rascher

Folge die Mehrzahl der grösseren schweizerischen Seen und die mit ihnen verbundenen Flüsse besiedelt (H. Turner, 1984). Den Zürichsee erreichte sie wahrscheinlich 1964, wurde hier 1969 zum ersten Mal gefunden und erreichte bereits im Winter 1972/73 den Populationshöchststand (H. Burla & V. Lubini-Ferlin, 1976).

8 Schützenswerte Habitate im Kanton Zürich wegen des Vorkommens bedrohter oder seltener Weichtierarten (Fundjahre, soweit bekannt, in Klammern)

Die bisherige Kenntnis der geographischen Verbreitung der Weichtierarten der Schweiz ist derart lückenhaft und stichprobenhaft, dass auch die Liste der nachfolgend genannten schützenswerten Habitate notgedrungen sehr unvollständig ist.

Bergweiher Chlausen bei Horgen
(Naturschutzgebiet) *Physella acuta* (1987)

Eglisauer Weinberghalden
Pomatias elegans (1915, 1973)
Granaria frumentum (o. J.)

Fischbach bei Niederhasli
Unio crassus (1971)

Gattiker Weiher
Physella acuta (1987)
Valvata cristata (1970)
Planorbis carinatus (o. J.)
Euconulus alderi (1987)

Glatt bei Dübendorf, Hochfelden etc.
Unio crassus (vor 1890)
Physella acuta (1971)
Planorbarius corneus (vor 1922)
Anodonta anatina (o. J.)

Greifensee
Unio crassus (o. J.; von Biese 1937 nicht mehr gefunden)
Physa fontinalis (1937)
Bithynia leachii (1937)
Viviparus ater (1937)
Valvata cristata (1937, 1964, 1965)
Acroloxus lacustris (1937, 1965)
Planorbis carinatus (1937)
Gyraulus acronicus (1937)
Gyraulus laevis (1937)
Gyraulus (Armiger) crista (1937)
Hippeutis complanatus (1937)
Segmentina nitida (1937)
Planorbarius corneus (1897, vor 1922, 1937)
Vertigo moulinsiana (1937)
Euconulus alderi (1937)
Unio pictorum (1937)

Hänsiried bei Zürich
Planorbis carinatus (1941)
Planorbarius corneus (1941)

Katzenbach
Planorbarius corneus (1929)

Katzensee
Segmentina nitida (vor 1922)
Valvata cristata (vor 1922, 1937)
Aplexa hypnorum (1915)
Planorbis carinatus (1914, 1937, 1942)
Planorbarius corneus (1913, 1937, 1941, 1944)
Vertigo moulinsiana (1937)
Anodonta anatina (o. J.)

Kellern bei Zumikon
Planorbis carinatus (1937)

Küsnachter Tobel
Balea (Alinda) biplicata (vor 1922, 1937, 1988)

Limmat-Altwasser beim Kloster Fahr
Unio crassus (o. J.)

Limmat-Altwasser b. Schlieren und Dietikon
Euconulus alderi (1937)
Segmentina nitida (1937)
Aplexa hypnorum (1937)
Valvata cristata (1937)

Lorze bei Maschwanden
Unio crassus (o. J.)

Moos bei Weiningen
Euconulus alderi (1943)

Pfäffikersee
Unio crassus (o. J.)
Valvata cristata (1937)
Aplexa hynorum (1937)
Physa fontinalis (1937)
Planorbis carinatus (vor 1890, 1937)
Anisus (Disculifer) vortex (1937)
Anisus (Disculifer) vorticulus (1937)
Gyraulus (Armiger) crista (1937)

Segmentina nitida (1937)
Planorbarius corneus (o. J.)
Vertigo moulinsiana (1937)
Vertigo (Vertilla) angustior (1937)
Euconulus alderi (1937)
Anodonta anatina (o. J.)
Pisidium amnicum (1937)

Rehalptobel
Granaria frumentum (o. J.)

Riet bei Schwerzenbach
Unio crassus (1917)

Schloss Teufen bei Freienstein
Zebrina detrita (o. J.)

Schnabelburg-Ruine
Balea perversa (1987)

Thur bei Thalheim
Unio crassus (o. J.)

Türlersee
Valvata cristata (1937)
Aplexa hypnorum (1937, 1973)
Planorbis carinatus (1937)
Unio pictorum (1988)
Pisidium amnicum (1937)

Uetlibergsumpf
Vertigo (Vertilla) angustior (o. J.)

Vogelsang bei Eglisau
Zebrina detrita (1962)

Waldweiher bei Horgen
Segmentina nitida (1970)
Acroloxus lacustris (1970)
Planorbis carinatus (1970)

Weiher unterhalb Schnabelburg
Valvata cristata (1987)

Zürichsee
Unio crassus (1920, 1982)
Viviparus ater (1915, 1937, 1973 etc.)
Valvata cristata (1937)
Bithynia leachii (1974, 1983)
Planorbis carinatus (1973, 1985)
Gyraulus laevis (1937)
Anodonta anatina (1845, 1937)
Unio pictorum (1982)
Pisidium amnicum (vor 1890, 1937, 1978)
Pisidium conventus (1978)
Pisidium milium (1978)
Pisidium pulchellum (1978)

Abschliessend muss betont werden, dass manche dieser schützenswerten Biotope seit den letzten Weichtierfunden schon so stark degradiert sind, dass ein Überleben der genannten Arten vielfach zu bezweifeln ist. Auf jeden Fall wären vor einer Unterschutzstellung Nachuntersuchungen notwendig. Die ökologischen Beziehungen der gefährdeten Arten (Kategorien 1 bis 3; s. Kap. 5.1–5.3) zeigen jedoch ganz klar, auf welche Biotop-Typen sich die Schutzbestrebungen in erster Linie richten müssen. Denn nicht weniger als 86% dieser gefährdeten Arten haben eine Präferenz für die Sumpf- und Wasserbiotop-Typen Nr. 9 bis 13, besonders Nr. 11: seichte pflanzenreiche Gewässer (39% der gefährdeten Arten) und Nr. 12: Stehende Gewässer, Teiche, Seen (25% der gefährdeten Arten). Der zweite Schwerpunkt bedrohter Naturräume zeichnet sich bei den Biotop-Typen Nr. 1 bis 3 ab, denn die restlichen 14% der effektiv gefährdeten Weichtierarten verteilen sich auf xerotherme Standorte und Trockenrasen, Felsensteppen sowie lichte warmtrockene Wälder.

9 Literatur

Biese, W., 1937. Beiträge zur Kenntnis der gehäusetragenden Mollusken von Zürich und Umgebung. Manuskript 52 S., 5 Abb., Zool. Mus. Univ. Zürich.

Blab, J. & Nowak, E., 1983. Grundlagen, Probleme und Ziele der Roten Listen der gefährdeten Arten. Natur u. Landschaft 58: 3–8.

Blab, J. & Nowak, E., 1986. Die Gefährdungskategorien der Roten Liste bestandsbedrohter Arten, ihre Wechselbeziehungen und ihre Anwendung. Schr.-Reihe Vegetationsk. *18*: 89–96.

Bollinger G., 1920. Mollusken aus der Schieferkohle von Dürnten. Festschrift f. F. Zschokke, Nr. 5: 1–17, Kober, Basel (1921).

Burla, H. & Lubini-Ferlin, V., 1976. Bestandesdichte und Verbreitungsmuster von Wandermuscheln im Zürichsee. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich *121*: 187–199.

Crozet, B., Pedroli, J.-C. & Vaucher, C., 1980. Premières observations de Potamopyrgus jenkinsi (Smith) (Mollusca, Hydrobiidae) en Suisse romande. Revue suisse Zool. *87* (3): 807–811.

Fechter, R. & Falkner, G., 1990. Weichtiere; Europäische Meeres- und Binnenmollusken. Mosaik Verlag, München, 287 S.

Forcart, L., 1963. Revision der von A. Gutzwiller aus Kalktuffen bei Feuerthalen (Kanton Zürich) beschriebenen Euthyneura (Moll.). Eclogae geol. Helv. *56* (2): 1165–1167.

Glöer, P., Meier-Brook, C. & Ostermann, O., 1986. Süsswassermollusken. 6. erw. Aufl., 86 S. Dtsch. Jugendbund f. Naturschutz, Hamburg.

Imholz, P. A., 1964. Die Makrofauna einer Uferstelle des unteren Zürichseebeckens; Ein Beitrag zur Oekologie steiniger Brandungszonen. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich *109*: 25–78.

Jackiewicz, M. & Gerber, J., 1990. Eine für die Bundesrepublik Deutschland neue Schlammschnecke: Lymnaea vulnerata Küster 1862 (Gastropoda: Pulmonata). Mitt. Dtsch. Malakozool. Ges. *47*: 1–5.

Jayet, A., 1950. Découverte d'une faunule malacologique de la fin du Pléistocène au contact de graviers günziens à Boppelsen (Canton de Zurich). Eclogae geol. Helv. *42* (2): 436–441.

Jungbluth, J. H., 1985. Deutsche Namen für einheimische Schnecken und Muscheln (Gastropoda et Bivalvia). Malakol. Abh. (Staatl. Mus. Tierkde. Dresden) *10* (10): 79–94.

Käser, U. J., 1980. Glazialmorphologische Untersuchungen zwischen Töss und Thur. Diss. Philos. Fak. II Univ. Zürich, 135 S.

Kaiser, K. F., 1979. Ein späteiszeitlicher Wald im Dättnau bei Winterthur/Schweiz. Diss. Philos. Fak. II Univ. Zürich, 90 S.

Kerney, M. P., Cameron, R. A. D. & Jungbluth, J. H., 1983. Die Landschnecken Nord- und Mitteleuropas. Parey, Hamburg u. Berlin.

Kinzelbach, R., 1987. Die Tierwelt im Rhein nach dem November 1986. Natur u. Landschaft *62* (12): 521–526.

Koster, B. & Winkler, J., 1985. Das Makrozoobenthon des Hochrheins im Jahre 1983. Unveröff. Diplomarbeit Inst. f. Zoologie Techn. Hochsch. Darmstadt, 334 S. u. 3 Tab. im Anhang.

Mermod, G., 1930. Gastéropodes. Catalogue des Invertébrés de la Suisse, Fasc. *128*: 1–583. Georg, Genève.

Paravicini, E., 1916. Einige für den Kanton Zürich neue Funde. Nachrichtsbl. Dtsch. Malakozool. Ges. *48*: 92–93, 192.

Ribi, G., 1986. Within-lake dispersal of the prosobranch snails, Viviparus ater and Potamopyrgus jenkinsi. Oecologia *69*: 60–63.

Ribi, G. & Arter, H., 1986. Ausbreitung der Schneckenart Potamopyrgus jenkinsi im Zürichsee von 1980 bis 1984. Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich *131* (1): 52–57.

Roth, W., 1906. Über die Herkunft und das Alter der Zürichseepaludina. Blätter f. Aquarien- u. Terrarienkde. *17* (H. 18): 175–176.

Schmid, G., 1979. Die Mollusken vom Grenzacher Horn. In: Die Natur- und Landschaftschutzgebiete Baden-Württembergs, *9*: 225–359.

Suter, H., 1898. Verzeichniss der Mollusken Zürichs und Umgebung. Rev. suisse Zool. *5*: 251–262.

Turner, H., 1984. Die Wandermuschel Dreissena polymorpha in der Schweiz. Club Conchylia, Informationen *16* (4): 40–46.

Turner, H. & Rüetschi, J., 1990. Progress report on the project "Inventory and habitat register of Swiss Mollusca". Proceedings 10th Internat. Malacol. Congr. Tübingen (in press).

Turner, H. & Wüthrich, M., 1985. Systematic Catalogue of Swiss Mollusca with IUCN categories of threat and short notes on distribution. Swiss Fed. Inst. Forestry Research Birmensdorf, 2nd rev. ed., 21 pp.

Turner, H., Wüthrich, M., Rüetschi, J. & Kuiper, J.G.J., 1990. Rote Liste der in der Schweiz gefährdeten Weichtierarten (Mollusca). Unveröff. Manuskript, WSL Birmensdorf.

Walter, J.E., 1980. Eine neue Schneckenart im Zürichsee: Potamopyrgus jenkinsi (Gastropoda: Prosobranchia). Vierteljahrsschr. d. Naturf. Ges. Zürich *152* (2): 197–200.

Dr. Hans Turner, Eidg. Forschungsanstalt WSL für Wald, Schnee und Landschaft, CH-8903 Birmensdorf

Buchbesprechung

Hans Leibundgut: Der Wald als Erbe und Verpflichtung. Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart 1990. 98 Seiten, Preis Fr. 38.–.

Das bereits ansehnliche Schriftgut von Hans Leibundgut ist durch einen neuen Zweig bereichert worden. Der Verfasser, em. und langjähriger Dozent für Waldbau an der ETH, ist als Lehrmeister für mehr als eine Generation von Forstleuten in unserem Lande wie kein zweiter dazu berufen, die Bedeutung unseres Waldes als Erbe und Verpflichtung für die Zukunft in seiner jüngsten Publikation darzulegen. Besondere Sympathie erweckt, dass er diese wegweisende Schrift seiner Heimatgemeinde Wasen-Sumiswald, die ihn übrigens zu ihrem Ehrenbürger erkoren hat, widmet. Dort, in den umliegenden wunderschönen Plenterwäldern, reifte die Idee zu diesem volumenmässig eher bescheidenen, inhaltlich aber um so gewichtigeren Buch.

Das Werk gliedert sich in 3 Abschnitte, von denen der dritte die Synthese der in den beiden vorangegangenen Teilen gewonnenen Erkenntnisse repräsentiert.

Im ersten, reich illustrierten Abschnitt wird das forstliche Erbe unseres Landes vorgestellt, seine Entwicklung und seine speziellen Eigenschaften in allen Belangen ausgeleuchtet, die sich in so vieler Beziehung von denjenigen unserer Nachbarstaaten unterscheiden. Der zweite Teil definiert das von früheren Generationen übernommene und weiterzugebende Erbe als Verpflichtung im Lichte des neuen, stark erweiterten Kataloges der Waldfunktionen. Eines der wichtigsten Anliegen des Verfassers besteht darin, dem Leser die Schlüsselrolle, die dem naturnahen Waldbau bei der Erfüllung dieser vielfältigen Funktionen zukommt, nahezubringen. Als besonders gewichtig ist seine Stellungnahme zu den Voraussetzungen und Erschwernissen, die sich der Ausübung der naturnahen Waldbaupraxis entgegenstellen, zu werten. Dazu gehören unter vielem anderen seine Vorstellungen über eine zeitgemässe forstliche Ausbildung aller Stufen und einer entsprechend effektiven Forstorganisation.

Im kurzgefassten Schlusswort stellt er die Waldwirtschaft der Zukunft in einen erweiterten Rahmen als politische Aufgabe im Sinne einer umfassenden Aufklärung der Behörden und Politiker aller Schattierungen und schlussendlich des ganzen Volkes. Nur so lässt sich eine Waldgesinnung schaffen, die sich darin äussert, der Waldwirtschaft der kommenden Generationen nicht nur moralische, sondern auch materielle Unterstützung angedeihen zu lassen.

Dieses wertvolle Bändchen fesselt den Leser von der ersten bis zur letzten Seite. Es gehört nicht nur in die Hände des forstfachlich interessierten Benützers, sondern sollte zur Pflichtlektüre aller mit den Belangen des Waldes und Holzes tätigen Behörden erklärt werden.

A. Lichti

Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/3: 183–185

Waldgesinnung

Hans Leibundgut, ETH-Zürich

In der neueren waldbaulichen Literatur erscheint der Begriff Waldgesinnung auffallend häufig, jedoch ohne Hinweis, was eigentlich darunter verstanden werden soll. *Köstler*[1] hat ihn schon 1953 verwendet mit der blossen Feststellung: «Was aber den Weg zu den waldbaulichen Leistungen eröffnet hat, das war *Waldpflege aus Waldgesinnung.*»

Um so mehr, als unser Bundesgesetz über die Forstpolizei vom Jahre 1902 nicht mehr als zeitgemäss betrachtet wird und bei der parlamentarischen Beratung des vom Bundesrat vorgelegten neuen Waldgesetzes in vereinzelten Voten wenig Waldgesinnung zu verspüren war, dürfte angebracht sein, diesen Begriff etwas zu klären und dessen Bedeutung hervorzuheben.

Der Verfasser hat zwar schon 1965 in einer Rektoratsrede[2] über Waldgesinnung gesprochen, aber dabei wurde vor allem die Denkweise der Forstleute behandelt. Es wurde hervorgehoben, dass diese tief in der Überlieferung wurzelt und zukunftsgläubig auf das Wohl kommender Geschlechter ausgerichtet ist.

Im folgenden wird die Waldgesinnung weniger als etwas rein Forstliches, als eine bei der Bevölkerung allgemein anzustrebende Einstellung gegenüber dem Wald verstanden. Sie wird deutlich von der Waldliebe unterschieden, denn diese bedeutet eine rein gefühlsmässige Einstellung, während die Waldgesinnung eine bewusste, auf Beweggründen beruhende Denkweise und Denkrichtung voraussetzt. Sie verlangt ein Wissen über das Wesen des Waldes, seine Funktionen und Wirkungen auf die Umwelt und seine Bedeutung für den Menschen. Das Waldverständnis ist die Voraussetzung für die in ethischer Hinsicht massgebenden Motive und Gründe des Willens, der dem Denken, Verhalten und Handeln gegenüber dem Wald zugrunde liegt.

Jede Kultur und Geschichtsepoche ist durch eine eigene Waldgesinnung gekennzeichnet, das heisst, eine eigene Art, die den Grad und die Wirkung der dem Wald zugemessenen geistigen und materiellen Werte betrifft.

Wo Wald wirklich oder vermeintlich im Überfluss vorhanden ist, bedeutet er des Siedlers Feind. Dort aber, wo die Rodung oder die Waldzerstörung sonstwie das tragbare Mass überschritten haben, sind alle Massnahmen zur Walderhaltung, Waldpflege und der Anlage von Schutzwaldungen durch Wiederaufforstungen als kulturelle Aufgaben aufzufassen. Unser Land befand sich schon vor hundert Jahren mit einer kaum halb so grossen Bevölkerungszahl wie heute und einer viel geringeren Besiedlungsdichte in dieser Lage. Im Bundesgesetz über das Forstwesen vom Jahre 1902 wurde jedoch die Erhaltung und Vermehrung des Waldareals bereits durch die Artikel 31 und 36 sichergestellt, was von einer beachtenswerten damaligen Waldgesinnung der Behörden und unseres Volkes zeugt. Inzwischen sind auch im Mittelland die meisten Wälder als Schutzwald erklärt und damit dem Kahlschlagverbot unterstellt worden. Ganz allgemein werden heute bei der Baumartenwahl die standortheimischen Arten bevorzugt und bei der Verjüngung und Behandlung der Wälder naturnahe Verfahren gewählt.

Alle diese Umstände haben dazu geführt, dass die Bevölkerung den Wald in jeder Hinsicht gesichert und in seinen Funktionen gewahrt glaubt. In Wirklichkeit bestehen aber heute stärker als jemals zuvor Nutzungs- und Flächenkonflikte. Da der Landwirtschaft zunehmend freiwillig oder erzwungen Flächen entzogen wurden und die umwelt- und landschaftsverzehrende Entwicklung sowie unsere Lebensweise den Wald zunehmend in den Interessenbereich dieser Verhältnisse rückt, erstaunt nicht, wenn der Ruf nach der Einbeziehung des Waldes in den Landverbrauch vor allem in bäuerlichen Kreisen immer lauter bis in die Ratssäle ertönt. Dabei besteht dieser Druck auf die Waldfläche hauptsächlich im Mittelland, also dort, wo drei Viertel aller Schweizer wohnen und nur ein Fünftel des gesamten Waldes stockt. Von den Befürwortern einer «Opfersymmetrie» und eines «paritätischen Flächenopfers» wird übersehen, dass das gesamte landwirtschaftliche Areal

[1] Köstler, N.: Waldpflege, Verl. Parey Hamburg und Berlin, 1953.

[2] Leibundgut, H.: Waldgesinnung, Schweiz. Ztsch. f. Forstwesen, 1965.

und der gesamte Siedlungsraum aus früheren Waldrodungen hervorgegangen sind und der Rest der Wälder aus zahlreichen Gründen nicht mehr weiter angetastet werden darf. Die Erhaltung der bestehenden Verteilung der Waldflächen ist sowohl im Hinblick auf die Umweltwirkungen, übrigen Sozialleistungen und unsere Rohstoffversorgung unumgänglich. Flächenverluste im Mittelland können nicht durch Aufforstungen in abgelegenen Gebirgstälern ausgeglichen werden. Den schweren und bedauerlichen Flächenverlusten der Landwirtschaft kann also nur durch einen möglichst weitgehenden flächenmässigen Schutz des Landwirtschaftsbodens, durch eine dichtere Überbauung des Siedlungsraumes und nicht zuletzt durch die Verminderung der bäuerlichen Bodenspekulation einigermassen begegnet werden.

Vor allem aber müssen wir uns allgemein bewusst werden, dass die Schweiz zu wenig Boden hat, um einer ständigen Zunahme des Bauvolumens und der überbauten Flächen genügen zu können. Der Wald vermöchte dazu selbst dann auf keinen Fall einen wirksamen Beitrag zu leisten, wenn die heute bestehenden Schutzbestimmungen gelockert würden.

Bei einer Flächenkonkurrenz der Landwirtschaft gegenüber der Waldwirtschaft ist auch auf folgende Unterschiede hinzuweisen:

Die Landwirtschaft hat eindrückliche Ertragssteigerungen durch Düngung, Schädlingsbekämpfung, Pflanzenzüchtung und andere Verbesserungen erzielt, wobei immerhin damit Umweltbelastungen verbunden sind. Durch den Rückgang der Kleinbauernbetriebe, die einer rationellen Bewirtschaftung dienenden Güterzusammenlegungen, die Abnahme des hochstämmigen Feldobstbaues, grossflächige und mechanisierte Anbau-, Pflege- und Ernteverfahren und andere, der Ertragssteigerung dienende Massnahmen hat das Landwirtschaftsareal seine Bedeutung als Erholungsraum der Menschen und als Schutz der natürlichen heimischen Tier- und Pflanzenwelt weitgehend verloren. Neben dem Hochgebirge und den wenigen unverbauten Fluss- und Seeufern ist der Wald zum letzten ausgedehnten Rest unserer Urlandschaft und zum wichtigsten Element des Landschafts- und Naturschutzes geworden.

Der verständliche Ruf nach Einbeziehung des Waldes in den Landverbrauch einerseits und anderseits alle in ihrer Bedeutung wachsenden Waldfunktionen verlangen heute, dass sich jeder einzelne Bürger mit diesem Problem befasst. Dies ist um so mehr angebracht, als rund drei Viertel der Wälder im Besitz der Kantone, Gemeinden und Korporationen sind. Ein gewisses Anrecht des einzelnen am Wald besteht auch dadurch, dass nach dem Schweizerischen Zivilgesetzbuch das Betreten von Wald jedermann gestattet ist.

Dem einzelnen Bürger bieten sich verschiedene Möglichkeiten, in forstlichen Angelegenheiten mitzureden. Durch eine Mitwirkung in den Organen des Staates, der Gemeinden und Korporationen, die Mitgliedschaft in Vereinen und ganz einfach als Stimmbürger kann jeder seinen Einfluss ausüben. Die Beweggründe dazu müssen von einem Verständnis für das Wesen des Waldes und seine Funktionen ausgehen. Dieses Verständnis prägt die dem Wald entgegengebrachte Gesinnung, eben die Waldgesinnung.

Das *Wesen des Waldes* ist dadurch gekennzeichnet, dass er mehr als eine blosse Ansammlung von Bäumen darstellt. Es ist ein höchst verwickeltes Beziehungsgefüge von Lebewesen verschiedenster Art von Bodenbakterien bis zu den mächtigen Waldbäumen, von physikalischen, chemischen und biotischen Bodenfaktoren und einem besonderen Waldinnenklima.

Die *Funktionen des Waldes* erstrecken sich vom Schutz gegen Naturgefahren, den vielseitigen Umweltwirkungen, dem Schutz vor Zivilisationsgefahren, der Bedeutung als Erholungsgebiet, dem Landschafts- und Naturschutz bis zu seiner Funktion als wichtigster Erzeuger organischer Rohstoffe. Alle diese Funktionen sind nicht ersetzbare, örtlich gebundene Flächenfunktionen. Artikel 31 des Forstgesetzes darf daher nicht dahin ausgelegt werden, dass die Gesamtfläche des Waldes, inbegriffen alle Schutzaufforstungen im Gebirge, nicht vermindert werden soll. Die Waldfunktionen sind überall, in allen Landesteilen, ungeschmälert zu erhalten.

Die Sozialfunktionen und die rein materielle Stofferzeugung sind zugleich gerade dort am bedeutendsten, wo der stärkste Rodungsdruck besteht. Obwohl nur ein Viertel des Waldes im Mittelland stockt, beträgt sein Produktionspotential über vierzig Prozent der gesamten Ertragsfähigkeit aller unserer Wälder.

Es ist zudem nicht zu übersehen, dass heute schon ganz West- und Mitteleuropa unter einem Holzmangel leidet, der nur durch skandinavische, osteuropäische und tropische Länder ausgegli-

chen wird. Alle diese Länder sind jedoch bemüht, das Holz selbst zu verwerten. In dieser Erkenntnis haben bereits 1956 unsere Holzindustrie und das Holzgewerbe an einer «Wald- und Holztagung» in Bern die ungeschmälerte Erhaltung aller produktiven Wälder verlangt. Die Tropenwälder dürfen nicht mehr als Weltholzreserve betrachtet werden, da ihre vollständige Erschöpfung in absehbarer Zeit vorauszusehen ist. Eine im Auftrag der amerikanischen Regierung eingesetzte Expertenkommission kam zum Schluss, dass das Holz im Hinblick auf das Schwinden der fossilen Rohstoffe und Energieträger als Mangelrohstoff der Zukunft bezeichnet werden muss. Dabei wurde auf seine zukünftige Bedeutung der chemischen Verwertung, wie für die Herstellung von Motortreibstoffen, Zucker und sogar Futtermitteln hingewiesen.

Wir sind daher alle an der Erhaltung des Waldes und seiner sachgerechten Bewirtschaftung interessiert. Die Erhaltung, das Wohl und Gedeihen des Waldes darf nicht allein die Forstleute beschäftigen. Forstgesetze unterliegen der Zustimmung des Volkes, die Walderhaltung ist nur durch dessen Willen gewährleistet, und auch die Organisation des Forstdienstes sowie die Waldbewirtschaftung unterliegen viel stärker seiner Waldgesinnung als gemeinhin angenommen wird.

Diese Waldgesinnung muss ganz bewusst gefördert und gepflegt werden. Dazu sind in erster Linie die forstlichen Behörden und Forstleute berufen. Entsprechende Bemühungen sollten bereits bei der Jugend beginnen. Der Wald eignet sich in bester Weise, um Zusammenhänge im Umwelt- und Naturgeschehen darzustellen, zum Naturschutz anzuregen und das Bewusstsein einer Verantwortung gegenüber der Natur und Umwelt zu schaffen. Dabei bieten Führungen im Wald und geeignete Jugendbücher, wie sie der Schweizerische Forstverein vor vielen Jahren herausgegeben hat, die besten und bewährten Möglichkeiten.

Auch bei Erwachsenen finden durch Fachleute geleitete Waldbegehungen stets ein erfreuliches Interesse. Forstliche Aufsätze in Tageszeitungen werden gerne gelesen, und ebenso sollten die Möglichkeiten zu Vorträgen in Vereinen vermehrt benützt werden.

Vor allem ist darauf hinzuweisen, dass die vor langer Zeit vom Schweizerischen Forstverein herausgegebenen Bücher über «Die forstlichen Verhältnisse der Schweiz» (2. Aufl. 1925) und des in drei Landessprachen veröffentlichten Buches «Unser Wald» (1929) längstens eines zeitgemässen Ersatzes bedürfen.

Die Schweizerische Forstpolitik hat sich schon in frühesten Jahren durch die forstlichen Amtsstellen des Bundes und der Kantone, den Schweizerischen Forstverein, den Verband für Waldwirtschaft und andere Organisationen intensiv und erfolgreich mit der Erhaltung und Verteilung des Waldareals, der Anlage neuer Schutzwaldungen im Gebirge, der Aus- und Weiterbildung forstlicher Arbeitskräfte und vielen anderen Problemen der Wald- und Holzwirtschaft befasst.

Heute sollte die Förderung der allgemeinen Waldgesinnung bei Behörden und Volk im Vordergrund der forstpolitischen Bestrebungen stehen. Sie ist nicht allein als Förderung der Waldwirtschaft zu betrachten, sondern vielmehr als ein Mittel, um der bedenklichen Entfremdung vom Natürlichen zu begegnen.

In dieser Überzeugung wurden im Verlag Haupt in Bern einige auch auf die Sozialleistungen des Waldes ausgerichtete Bücher herausgegeben[3].

Der führende Wiener Waldbauprofessor *Hannes Mayer* hat zurecht festgestellt: «Walderhaltung und Waldpflege bedeuten Vor- und Fürsorge für Menschen von morgen und übermorgen – für kommende Generationen.»

Ebenso ist die Waldgesinnung als wesentliche Voraussetzung für sinnvoll auf die Zukunft ausgerichtete Entscheide in allen den Wald betreffenden Belangen aufzufassen.

[3] Leibundgut, H.: Die Aufforstung (1982); Die Waldpflege (1984); Der Wald in der Kulturlandschaft (1985); Unsere Gebirgswälder (1986); Waldbau heute (1988); Unsere Laubwälder (1988); Waldbau im Privatwald (1990); Waldbau als Naturschutz (1990); Der Wald als Erbe und Verpflichtung (1991); Der Wald als Wirkungs- und Beziehungsgefüge (1991).

Prof. em. Dr. Hans Leibundgut, Stallikerstrasse 42, 8142 Uitikon-Waldegg.

Vorträge der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich Wintersemester 1990/91 (Kurzfassungen)

5. November
Unser nächster Stern, neue Projekte in der Sonnenforschung
Prof. Dr. *Jan Olof Stenflo*, Institut für Astronomie der ETH Zürich

Die Aktivität der Sonne und Sterne ist durch magnetische Kräfte verursacht. Mit einem internationalen Grossteleskop auf den Kanarischen Inseln soll die Feinstruktur der solaren Magnetfelder erforscht werden. Neue Möglichkeiten zur Bestimmung der inneren Struktur der Sonne ergeben sich durch die «Helioseismologie», die Untersuchung der globalen Eigenschwingungen der Sonne.

19. November
Wie gesund ist die Luft in Zürich?
(Podiumsgespräch und Diskussion)
Herr Dr. *R. Eggli*, Leiter der Umweltschutzfachstelle der Stadt Zürich
Frau Dr. *S. Staub-Bernasconi*, Dozentin an der Schule für Soziale Arbeit Zürich, Lehrbeauftragte der Universitäten Trier und Freiburg
Herr Prof. *H.U. Wanner*, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie ETH Zürich, Präsident der Eidg. Kommission für Lufthygiene

Gesprächsleitung:
Frau Dr. med. *E. Brack*, Sektionspräsidentin «Ärzte für Umweltschutz», Zürich

Es wird dargelegt, was die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung sind und wie sie erarbeitet werden. Die Gesundheit der Luft in der Agglomeration Zürich und Massnahmen zu ihrer Verbesserung werden diskutiert.

Es soll versucht werden, das Ganze in den grösseren Rahmen des Zusammenspiels Wohnbevölkerung, menschliche Grundbedürfnisse, Wirtschaft und Politik zu stellen.

3. Dezember
Chiropraktik: Historische Aspekte – Situierung in der Schulmedizin – Grundkonzepte
Dr. med. *P. Kränzlin*, Winterthur

Zusammenfassung: Historisch-Anekdotisches aus der Frühzeit der Chiropraktik in den USA und der Schweiz, das Krankheitsverständnis um die Jahrhundertwende – Vergleiche mit der Schulmedizin, 1939 die Zulassung der Chiropraktik zur selbständigen Praxis im Kanton Zürich, 1965 Aufnahme ins Kranken- und Unfallversicherungsgesetz (KUVG).

Die moderne Chiropraktik: Ausbildung, Fortbildung und Forschung. Umschreiben des Tätigkeitsgebietes und Situierung als Subspezialität in der Schulmedizin.

Einführung in das Konzept: Wirbelsäulen-Schmerzsyndrom – Blockierung des Wirbelgelenks und die chiropraktische Manipulation.

17. Dezember
Erlebte Erdgeschichte rund um Zürich
Prof. Dr. [illegible], ETH Zürich

Es soll versucht werden, das nie abreissende geologische Spiel von Abtrag und Aufschüttung an der uns wohlvertrauten Umgebung von Zürich zu verfolgen und in einen etwas grösseren erdgeschichtlichen Rahmen zu stellen.

Dazu bezeichnen wir als «Aktuogeologie» die heute in unserer Gegenwart stattfindenden natürlichen geologischen Vorgänge, deren Augenzeugen wir sind, und als «Anthropogeologie» [illegible] der Mensch in dieses natürliche Geschehen eingreift und es bewusst oder unfreiwillig beeinflusst. Diese anthropogeologische Aktivität zwingt uns heute zu einer Relativierung des

Begriffs des geologischen Aktualismus im klassischen Sinne, stellt doch die Tätigkeit des Menschen einen geologischen Faktor dar, der früher fehlte, der aber in Zukunft progressiv zunehmen wird.

7. Januar
Tiefbohrungen im Jakobshavngletscher, Grönland
Ein Beitrag zur Erforschung der Bewegungsmechanismen grosser Eisströme
Dr. *Almuth Iken*, ETH-Zürich

Der Jakobshavngletscher befördert jährlich 37 Kubikkilometer Eis ins Meer; an der Kalbungsfront beträgt die Geschwindigkeit 7 km/Jahr. Zur Untersuchung des Mechanismus der hohen Geschwindigkeit wurden Heisswasserbohrungen bis zu einer Tiefe von 1630 m durchgeführt. In den Bohrlöchern wurden Eistemperaturen, Eisdeformation und subglazialer Wasserdruck gemessen. Die Resultate der Messungen weisen darauf hin, dass die Bewegung dieses Eisstromes zu einem grossen Teil auf Eisdeformation zurückzuführen ist, wobei die leicht deformierbare Basisschicht des Eises eine wichtige Rolle spielt.

21. Januar
Virusinfektionen: Prozesse der Erkrankung und Genesung
Prof. Dr. *O. Haller*, Freiburg i. Br.

Die modernen Methoden der Zell- und Molekularbiologie erlauben neue Einblicke in grundlegende Vorgänge der Virus-Wirtszell-Interaktion und der Virusabwehr. Influenzaviren gehören zu den bestuntersuchten Viren. Wir haben heute klare Vorstellungen über früher als rätselhaft geltende Vorgänge, wie die jährliche Wiederkehr des Virus in der Bevölkerung, die krankmachenden Eigenschaften des Virus und die Überwindung der Infektion durch den Körper. Wir werden diese Frage anhand experimenteller Systeme diskutieren.

4. Februar
Neue Informatikwerkzeuge für die Visualisierung von Daten aus Wissenschaft und Technik
Prof. Dr. *Peter Stucki*, Universität Zürich

Die Informatik stellt für die rechnergestützte Aufbereitung und Darstellung von Daten und Modellen aller Art neue und leistungsfähige Hardware- und Software-Werkzeuge zur Verfügung, die heute in vielen Fachbereiche der Naturwissenschaften und der Technik vermehrte Nutzung finden.

Nach einer einleitenden Schilderung der Entwicklung der Computertechnik werden bekannte und neue Konzepte für die 2D- und 3D-Visualisierung vorgestellt. Anhand konkreter Aufgaben aus der Praxis (Erdwissenschaften, Medizin, Ingenieurwesen) werden die Datenaufbereitungsschritte – von der Datenakquisition bis hin zur Datenrepräsentation durch Animation – besprochen und demonstriert.

18. Februar
Podiumsgespräch: **Die Beobachter-Initiative und ihr Gegenvorschlag zur Gentechnologie: Pro und Contra**
Gesprächsleiter: Prof. Dr. *P. Hoyningen*, Konstanz/Zürich
Teilnehmer: Prof. Dr. *H.M. Eppenberger*, Zürich; Prof. Dr. *H.J. Müller*, Basel; Dr. *H.P. Schreiber*, Basel; Prof. Dr. *Ch. Weissmann*, Zürich; Prof. Dr. *P. Widmer*, Lausanne.

Im Rahmen eines Podiumsgesprächs sollen die Vorschläge zur Regelung der Forschung und der Anwendung in den Bereichen Fortpflanzungsmedizin und der Gentechnologie kritisch diskutiert werden. Dabei sollen naturwissenschaftliche, medizinische, ethische und juristische Gesichtspunkte zur Sprache kommen. Das Publikum ist eingeladen, Fragen zu stellen und Meinungen zu äussern.

Erratum

In der Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich ist im Heft 3, 1990, S. 191 die Zusammenfassung meines Vortrags über «Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: Chemische Aspekte» abgedruckt.

Ich hatte bereits bei meinem Vortrag darauf aufmerksam gemacht, dass sich in der gedruckten Einladung zum Vortrag ein störender Fehler eingeschlichen hat. Leider erscheint derselbe Fehler nun nochmals. Der erste Satz des zweiten Abschnitts der Zusammenfassung lautet richtig:

«Sicherheitsananlysen haben nachzuweisen, dass die aus der Nuklidfreisetzung resultierende Strahlenexposition das behördlich festgelegte Schutzziel nicht überschreitet.» (und nicht: ... haben nachgewiesen»).

Weil mit diesem Fehler der Sinn meiner Aussage abgewandelt wird, lege ich grossen Wert darauf, dass in einem der nächsten Hefte der Zeitschrift eine Richtigstellung erfolgt.

R. Grauer, Paul Scherrer Institut, Villigen

Hinweise für Autoren

1 **Manuskript**

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende, hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle . . .).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. R. Popper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 **Bilder**

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild . . .) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500:1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 136, Heft 3, September 1991

Inhalt

Preis Fr. 13.–

Heft 4
Jahrgang 136
Dezember 1991

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

NGZ Naturforschende Gesellschaft in Zürich

Naturforschende Gesellschaft in Zürich (gegr. 1746)

Zweck der Gesellschaft: Förderung der Naturwissenschaften und Verbreitung der Kenntnis der Natur sowie Erneuerung der Querverbindungen zwischen den naturwissenschaftlichen, medizinischen, veterinärmedizinischen, pharmazeutischen und technischen Forschungsrichtungen.

Anmeldung neuer Mitglieder: Anmeldekarten für die Mitgliedschaft sind vom Aktuar der Naturforschenden Gesellschaft, *Dr. Heinrich Bührer EAWAG/ETH, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Tel. 823 51 85*, zu beziehen. Jahresbeiträge: Einzelmitglieder Fr. 50.– (Studierende Fr. 20.–), Kollektivmitglieder wie Firmen oder Vereinigungen mindestens Fr. 100.–.

Publikationen: Die Hefte der *Vierteljahrsschrift* werden den Mitgliedern gratis zugestellt. Für Nichtmitglieder beträgt das jährliche Abonnement Fr. 78.–.
Auf den Jahreswechsel veröffentlicht die Naturforschende Gesellschaft ein *Neujahrsblatt*, das den Mitgliedern ebenfalls gratis abgegeben wird; für Nichtmitglieder ist es im Jahresabonnement inbegriffen.
Es sind auch Einzelhefte der Vierteljahrsschrift und Einzelexemplare des Neujahrsblattes erhältlich; die Preise richten sich nach dem jeweiligen Umfang. Bestellungen werden erbeten an Orell Füssli, Graphische Betriebe AG, Postfach, 8036 Zürich.

Manuskripte: In die Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft werden Manuskripte aus dem gesamten Gebiet der Naturwissenschaften aufgenommen. Die Beiträge können in Deutsch, Französisch oder Englisch abgefasst sein. Ihr Umfang soll in der Regel zwanzig Manuskriptseiten nicht überschreiten; für grössere Arbeiten wird ein Druckkostenbeitrag erhoben. – Im Interesse einer reibungslosen Abwicklung der Drucklegung bitten wir die Autoren, vor der Abfassung eines Manuskriptes die «Hinweise für Autoren» auf der dritten Umschlagseite zu beachten. Manuskripte, die nicht der beschriebenen Form entsprechen, müssen zur Ergänzung an die Autoren zurückgeleitet werden.
Manuskripte sind zu senden an:

Prof. em. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
CH-8450 Andelfingen

Schriftentausch: Institute und Gesellschaften des In- und Auslandes, welche mit der Vierteljahrsschrift im Austausch stehen, bitten wir, alle Sendungen nicht an die Adresse des Präsidenten oder der Redaktion zu richten, sondern direkt an die *Tauschstelle der Zentralbibliothek in Zürich (Zähringerplatz 6, 8001 Zürich)*. – Für die Rückgabe nicht gebrauchter oder älterer Hefte der Vierteljahrsschrift ist die Tauschstelle dankbar.

Citation: This publication is included in the abstracting and indexing coverage of the BioSciences Information Service of Biological Abstracts.

Verlag: OF **Orell Füssli Zeitschriften**
Graphische Betriebe AG
Dietzingerstrasse 3, CH-8036 Zürich Postfach

Druck: Ehrli Druck AG, Dorfplatz 3, 6060 Sarnen

lage: 2230; Tauschexemplare 546.

'0042–5672

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/4: 189–206

Treibhauseffekt und Pflanzenwachstum

Herbert Blum, ETH Zürich

Die Klimamodelle zeigen grosse Fehler bei der Berechnung des heutigen Klimas, sie sind bei weitem noch nicht validiert. Die Modelle sind sehr sensitiv gegenüber verschiedenen Wolkenparametern, die ihrerseits noch gar nicht zuverlässig bestimmt worden sind. Verschiedene klimawirksame Prozesse sind nicht oder ungenügend berücksichtigt. Die Klimaprognosen können nicht angenähert als zuverlässig betrachtet werden.

Der berechnete Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre, von ungefähr 0,5 °C, basiert auf z.T. unsicheren Annahmen und Korrekturen. Er liegt im Bereich der natürlichen Variation des Klimas. Das Ausmass und die geographische Verteilung dieser Erwärmung stimmen nicht mit den Vorhersagen überein. Die Eisbohrkerne aus der Antarktis widersprechen dem für den Treibhauseffekt charakteristischen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang.

Der CO_2-Anstieg fördert das Pflanzenwachstum primär durch zwei Effekte:

Eine starke Zunahme der Photosynthese, die bei CO_2-Verdoppelung zu einer Wachstums- und Ertragszunahme von ca. 25–100% führt und eine Verminderung der Transpiration von ähnlichem Ausmass. Das Temperaturoptimum des Wachstums erhöht sich um etwa 2 °C, die Pflanzen würden von einer mässigen Temperaturerhöhung sogar profitieren. Die Wassernutzungseffizienz wird etwa verdoppelt, d.h. unter limitierenden Bedingungen kann mit dem verfügbaren Wasser ein etwa doppelt so hohes Wachstum erwartet werden. Alle diese Effekte nehmen auch bei einem CO_2-Anstieg über 600 ppm hinaus weiterhin zu.

Die Forderung nach einer Reduktion des CO_2-Ausstosses ist für die am stärksten industrialisierten Länder sinnvoll, hätte aber für die Entwicklungsländer katastrophale Folgen.

Greenhouse Effect and Plant Growth

Calculations of present day climate with models indicate great errors. These models are not validated. They proved to be very sensitive on variations of different cloud parameters which have not been determined yet with sufficient accuracy. Some sensitive processes are not yet included. The model predictions are not reliable.

The increase of global temperature for the last 100 years has been evaluated with questionable assumptions and corrections. The value of approx. 0.5 °C is within natural variation of climate. The amount and the geographical pattern of this increase don't agree with the predictions. The antarctic ice-cores contradict the greenhouse-relevant cause-effect relation.

The CO_2 increase promotes plant growth mainly by two effects:

A CO_2 doubling increases photosynthesis significantly, such that a growth increase of approx. 25–100% is effected. The optimum temperature of growth increases about 2 °C, thus plants would even profit from a moderate temperature increase.

A decrease of transpiration which can cause a growth increase, too. Water use efficiency is approx. doubled, i.e. with limiting water supply, plant growth would nearly double.

These effects all continue to increase beyond a CO_2 doubling.

The demand for a reduction of CO_2 production is reasonable for the most industrialized countries but it would be catastrophic for the developing countries.

1 Einleitung

Das Thema «Treibhauseffekt» beschäftigt die Öffentlichkeit und die Wissenschaften in den letzten Jahren in beträchtlichem Masse. Die Zunahme verschiedener

Spurengase in der Atmosphäre, vor allem von Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4), soll demnach zu Klimaänderungen mit schwerwiegenden Folgen für Natur und Menschen führen. Die Grundlagen des Treibhauseffektes und seiner prognostizierten Folgen (vgl. z. B. S.H. Schneider 1989, C. Schoenwiese und B. Diekmann 1987) werden hier als bekannt vorausgesetzt. Die Vorhersagen von Klimaänderungen basieren auf Berechnungen mit Klimamodellen. Diese ergeben für eine CO_2-Verdoppelung in der Atmosphäre (von 300 auf 600 ppm) einen Anstieg der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche um etwa 1,5 bis 4,5 °C.

Eine Bestätigung dieser Modellberechnungen wird im Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre gesehen, sowie in den Untersuchungen an Eisbohrkernen aus der Antarktis. Während bei uns diese Sicht noch weitgehend unkritisch verbreitet wird, ist vor allem in den USA die wissenschaftliche Auseinandersetzung zu diesen Fragen längst im Gang. Eine kritische Darstellung findet der Leser z. B. bei S. Idso (1989).

2 Die Modelle

Um Vertrauen in die Klimamodelle zu bekommen, müssten diese in der Lage sein, das heutige Klima einigermassen richtig zu berechnen. Dies ist jedoch bei weitem nicht der Fall. M. Schlesinger und Z. Zhao (1989) z. B. finden Abweichungen der berechneten von den gemessenen Meeresoberflächen und Lufttemperaturen von ± 6 °C in grossen Gebieten. Auf den Kontinenten betragen die Fehler der berechneten Lufttemperaturen i. A. etwa ± 5 °C, in Einzelfällen bis 10 °C. Dies entspricht etwa der Differenz zwischen der letzten Eiszeit und heute. In der Arktis werden Abweichungen bis etwa 10 °C und in der Antarktis gar bis 20 °C berechnet. Die Temperaturdifferenz vom Äquator zu den Polen, die für die globalen Zirkulationssysteme (Winde, Meeresströmungen) von grosser Wichtigkeit ist, wird mit einem Fehler von 20 °C oder mehr berechnet. Aber auch andere berechnete Klimagrössen, wie Niederschlag (Fehler von ± 3 mm/Tag), Bewölkung, Winde zeigen grosse Fehler. Ähnliche Fehler werden auch mit anderen Modellen berechnet. Durch Anpassungen empirischer Grössen wird jedoch dafür gesorgt, dass die globalen und in einigen Fällen auch die zonalen Mittelwerte (z. B. der Temperatur) den beobachteten Werten recht gut entsprechen (tuning). Sogar die Solarkonstante wird manchmal zu diesem Zweck stark verändert (M. Schlesinger und J. Mitchell 1987). Diese Anpassungen verdecken jedoch nur die Mängel in der Physik der Modelle, die berechneten Klimaänderungen werden dadurch nicht genauer.

Die Temperatur an der Erdoberfläche wird in der Natur durch vielerlei Prozesse bestimmt und dementsprechend in den Modellen durch das Zusammenwirken verschiedener Teilprozesse berechnet. Wenn diese Teilprozesse Fehler enthalten, so können sich diese gegenseitig kompensieren, so dass fälschlicherweise der Eindruck einer guten Übereinstimmung mit der Realität entsteht. Dieses Phänomen ist aus der Simulation komplexer Systeme gut bekannt und es ist unbestritten, dass Modelle nur dann als zuverlässig gelten können, wenn sämtliche Teilprozesse überprüft, d. h. ihre Ergebnisse mit der Realität verglichen worden sind. Es ist unbestritten und durch viele Beispiele belegt, dass diese Validierung aller Elemente

der Klimamodelle noch lange nicht durchgeführt worden ist (M. Schlesinger und J. Mitchell 1987, A. Slingo 1989). So hat etwa B. Weare (1988) mit einem General Circulation Model (GCM) verschiedene Strahlungskomponenten berechnet und diese mit Beobachtungen verglichen. Er findet Abweichungen bei allen Komponenten in der Grösse von etwa 20 W/m^2, bei einzelnen gar bis 60 W/m^2. Dies ist 5- bis 15mal mehr als die 4 W/m^2, die bei einer CO_2-Verdoppelung zusätzlich in der Atmosphäre absorbiert werden sollen. (Die atmosphärische Rückstrahlung beträgt im Mittel 327 W/m^2). Eine neue Arbeit von J. Kiehl und V. Ramanathan (1990) zeigt, dass die Modelle inzwischen kaum genauer geworden sind.

Die verschiedenen Modelle ergeben zudem keineswegs übereinstimmende Ergebnisse, wie mehrere Vergleichsstudien belegen. M. Schlesinger und J. Mitchell (1987) z. B. fanden grosse quantitative und gar qualitative (entgegengesetzte Effekte) Unterschiede in den Berechnungen der drei bekanntesten Modelle. Dafür sind Fehler in den Modellen verantwortlich.

Die zusätzliche Absorption von langwelliger Strahlung durch das CO_2 sollte nur zu einer geringen Erwärmung führen. In den Modellen jedoch wird diese durch positive Rückkoppelungen (feedbacks) um etwa einen Faktor 3 verstärkt. Einer der wichtigsten feedbacks kommt durch den Anstieg des Wassergehalts in der Atmosphäre zustande als Folge der Erwärmung der Erdoberfläche. Wasserdampf ist jedoch das wichtigste Treibhausgas und seine Zunahme würde den Treibhauseffekt verstärken. Ein weiterer positiver feedback entsteht durch Veränderungen der Wolken. Einerseits reflektieren diese einfallende Sonnenstrahlung und anderseits absorbieren sie langwellige terrestrische Strahlung. Während bei tiefliegenden Wolken die Reflexion überwiegt, ist dies bei hohen Cirruswolken die langwellige Absorption. Im globalen Mittel über alle Wolken stellten V. Ramanathan et al. (1989) einen netto Kühlungseffekt von etwa 13 W/m^2 fest, d. h. im Mittel überwiegt die Reflexion. Ohne Wolken läge die mittlere Erdatmosphärentemperatur etwa 18 °C höher (C. Platt 1989). Es stellt sich somit die Frage, wie sich die Anteile der verschiedenen Wolkentypen und deren Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften bei einer CO^2-bedingten Erwärmung verändern würden (Wolken-feedbacks). Modellberechnungen ergaben z. B. eine Zunahme der hohen und eine Abnahme der niederen Wolken und damit einen positiven Feedback. Die unterschiedlichen Wolken-feedbacks der Modelle scheinen die wichtigste Ursache für die grossen Unterschiede der Berechnungen zu sein (R. Cess et al. 1990). Dies belegt einmal mehr die grosse Unsicherheit dieser Berechnungen. Es sind zudem eine Reihe von negativen Rückkoppelungen vorgeschlagen worden, die der CO_2-bedingten Erwärmung entgegenwirken oder diese sogar grösstenteils aufheben könnten. J. Mitchell et al. (1989) z. B. berechneten die Auswirkungen von Änderungen des Eisgehaltes von Schichtwolken auf die Temperaturänderung bei CO_2-Verdoppelung. Sie fanden, dass sich allein durch diesen Effekt die globale Erwärmung von 5,2 °C auf 1,9 °C reduzierte! Einige Parameter von niedrigen Wolken beeinflussen die Modellberechnungen ebenfalls sehr empfindlich (A. Slingo 1990). Für die meisten dieser Mechanismen kennt man jedoch die wirklichen Verhältnisse in der Atmosphäre zu wenig genau, um sie korrekt berücksichtigen zu können. A. Slingo (1989) bezeichnet diese Studien richtigerweise als Sensitivitätsstudien und er meint dazu: «The

substantial sensitivity of climate models to the details of their formulation, and the fact that 14 models give 14 different answers for the cloud feedback, show that we are far from the goal of accurate predictions of future climate change... it will be several years before reliable predictions of global and regional climate change are available from the models.»

Die durch den Anstieg der Treibhausgase verursachte zusätzliche Absorption von Wärmestrahlung führt zudem nicht vollumfänglich zu einer Erwärmung der Erdoberfläche (R. Lindzen 1990). Die Erdoberfläche ist nicht in einem Strahlungsgleichgewicht, sondern der grösste Teil der eingestrahlten Energie wird durch Verdunstung und Konvektion abgeführt. Eine wichtige Rolle spielen dabei konvektive Wolken, die den Wasserdampf in Höhen über 5 km führen. Bei der Kondensation wird die transportierte Energie frei und in der optisch viel dünneren Umgebung effizient abgestrahlt, ein Teil davon in den Weltraum. Diese Kumuluswolken stellen somit einen effizienten Kühlmechanismus dar. Ohne Konvektion hätte die Erdoberfläche eine mittlere Temperatur von etwa 77 °C, statt der 15 °C, die man tatsächlich aus Temperaturreihen ermittelt. Nach R. Lindzen hat das Treibhaus der Erde eine Effizienz von bloss etwa 25 %! Der Treibhauseffekt wird durch die Konvektion somit grösstenteils überbrückt oder kurzgeschlossen. Wichtig ist somit vor allem die Konzentration der Treibhausgase oberhalb etwa 5 km, denn die Absorption der Wärmestrahlung oberhalb dieser Höhe ist für die terrestrische Energiebilanz entscheidend. Das wichtigste Treibhausgas jedoch ist der Wasserdampf. Die Luft an der Obergrenze der Kumuluswolken hat durch das Ausregnen viel von ihrer Feuchtigkeit verloren, sie ist also trockener geworden. Zur Aufrechterhaltung der Aufwärtszirkulation in den Wolken muss diese Luft wieder nach unten strömen. Die Kumuluskonvektion führt somit zu einer Ansammlung trockener Luft oberhalb 3 bis 5 km Höhe und dadurch zu geringerer Absorption langwelliger Strahlung. Ähnlich verhält es sich mit dem polwärts transportierten Wasserdampf: Die Kondensationswärme wird in einer kühleren und damit optisch dünneren Umgebung freigesetzt und effizient abgestrahlt. Diese Tatsachen allein wecken schon Zweifel an den Modellvorhersagen, denn diese Mechanismen verringern den an sich schon kleinen Effekt der Treibhausgase.

Weitere Untersuchungen und insbesondere Messungen der Wolkenparameter sind nötig, um diese Mechanismen in die Modelle einbauen zu können. In den bisherigen Modellen fehlen viele Prozesse und andere werden nur durch einfache Näherungen berücksichtigt, so dass ihre Resultate in keiner Weise als zuverlässig betrachtet werden dürfen. Die Aussagen mehrerer führender Fachleute lassen daran keinen Zweifel, so meint etwa V. Ramanathan (1988) «... since clouds are treated primitively in GCMs, it is premature to make reliable inferences from GCM studies.»

3 Die Klimadaten

esichts der unzuverlässigen Modellberechnungen erhalten Untersuchungen 'erlaufs der globalen Erdoberflächentemperatur während der letzten etwa 100 :n eine grosse Bedeutung. In dieser Zeitspanne stieg die CO_2-Konzentration

der Atmosphäre von etwa 280 ppm auf den heutigen Wert von annähernd 350 ppm. Wegen der logarithmischen Abhängigkeit der Erwärmung vom CO_2-Anstieg sollte daraus bereits etwa die Hälfte der bei einer CO_2-Verdoppelung zu erwartenden Erwärmung aufgetreten sein. Allerdings wirken die Ozeane als Wärmepuffer, so dass der Temperaturanstieg langsamer erfolgt. V. Ramanathan (1988) hat diesen Verlangsamungseffekt untersucht. Demnach steigt die Temperatur während mehreren Dekaden bis ca. 100 Jahren kontinuierlich an, bis sie ihr Maximum erreicht, das dem neuen Gleichgewichtszustand entspricht. Unter Berücksichtigung der Verzögerung berechnet V. Ramanathan während den letzten 100 Jahren eine Erwärmung von 0,5 bis 1,1 °C. Dies führt bei CO_2-Verdoppelung schliesslich zu einem Temperaturanstieg von 1,1 bis 4,5 °C. Man beachte, dass demnach eine bis heute erfolgte Erwärmung von 0,5 °C zu einem maximalen Wert von 1,1 °C (bei CO_2-Verdoppelung) führt!

Die Bestimmung des Verlaufs der mittleren Erdoberflächentemperatur ist schwieriger als gemeinhin angenommen wird (H. Elsaesser et al. 1986, T. Karl et al. 1989). Die wichtigsten Probleme seien hier kurz erwähnt:

– Die Dichte der Messstationen an Land war vor allem im letzten Jahrhundert gering und selbst um 1900 nicht für eine zuverlässige Bestimmung der mittleren globalen Temperatur ausreichend. Etwa 70 % der Erdoberfläche sind zudem Meere und die Lufttemperatur wurde dort auf Schiffen gemessen. Die Schiffsrouten bedeckten jedoch bis weit in dieses Jahrhundert hinein nur einen geringen Teil der Ozeane (um 1900: <20%). Für die restlichen Gebiete liegen deshalb nur gelegentliche oder gar keine Messungen vor. Selbst heute werden bloss 2/3 der Ozeanoberfläche von Messungen erfasst. Die Berücksichtigung solcher sporadischer Messwerte und die Extrapolation von Messwerten in Gebiete weitweg von den nächsten Messstationen bewirken eine beträchtliche Unsicherheit in den berechneten Mittelwerten.

Hinzu kommen eine Reihe von Fehlern in den Messdaten selbst:

– Die Fehler der Instrumente lagen früher bei etwa 0,5 °C, heute sind sie kleiner.

– Änderungen des Messortes, des Instruments, des Instrumentengehäuses und der Messhöhe. Viele solche Änderungen sind dokumentiert, jedoch bei weitem nicht bei allen Stationen. Die Messreihen vieler Stationen enthalten somit Trends bis zu 1 °C! Die angebrachten Korrekturen enthalten ebenfalls beträchtliche Unsicherheiten.

– Veränderungen in der Umgebung der Messorte. Viele Messstationen liegen in Orten, deren Bevölkerung im Laufe der Zeit stark zugenommen hat. Dies bewirkt eine Temperaturzunahme am Messort, die jedoch ausserhalb dieses Ortes nicht aufgetreten sein muss. Die globalen Datensätze wurden mit der in den USA gefundenen Korrektur versehen, es bleibt jedoch eine Unsicherheit von etwa 0,1 °C.

– Änderungen des Beobachtungszeitpunktes und der Mittelwertbildung. Seit Beginn dieses Jahrhunderts wurden in den meisten Staaten die Tagesmittel als Durchschnitt von Maximum und Minimum in einem 24-Stunden-Intervall berechnet. Diese Mittelwertbildung gibt selbst Anlass zu Fehlern von mehr als ± 1 °C. Zudem wurden in vielen Ländern im Laufe der Zeit die Beobachtungszeitpunkte und/oder die Methode zur Berechnung der Mittelwerte geändert, wodurch wieder-

um Fehler entstehen können. Diese Fehler wurden bisher in den Datensätzen noch nicht korrigiert!

– Die Schiffsmessungen enthalten eine Reihe schwer abschätzbarer Fehler, die wegen der Grösse der Ozeane stark ins Gewicht fallen.

Es ist fraglich, ob und in welchem Mass alle diese Fehler durch die grosse Zahl von Daten ausgeglichen werden. Die globale Erwärmung der letzten 100 Jahre wird mit 0,3–0,6 °C angegeben (IPCC I 1990). Alle Korrekturen zusammen sind jedoch etwa gleich gross wie die berechnete Temperaturänderung. Deshalb muss diese als unzuverlässig betrachtet werden (R. Lindzen 1990).

Der Temperaturanstieg muss ausserdem nicht mit Sicherheit durch den CO_2-Anstieg verursacht worden sein. R. Bryson (1989) weist darauf hin, dass das Ende der kleinen Eiszeit, die etwa um 1530 begann, irgendwann zwischen Mitte des 19. und Mitte des 20. Jahrhunderts liegen kann. Es erscheint jedenfalls willkürlich, das Ende der kleinen Eiszeit auf etwa 1880 festzulegen und einen seitherigen Temperaturanstieg dem Treibhauseffekt zuzuschreiben, während der Anstieg vor 1880 dem Ende der kleinen Eiszeit angerechnet wird. Der grösste Teil der beobachteten Erwärmung trat zudem vor 1940 ein, während der starke CO_2-Anstieg erst seither einsetzte. Nach 1940 sank die Temperatur insbesondere auf der nördlichen Halbkugel und seit etwa 1975 steigt sie wieder an. Betrachtet man die Erwärmung zu Beginn des Jahrhunderts als Folge des vorausgegangenen CO_2-Anstiegs, so bedeutet dies, dass im Klimasystem nur eine geringe zeitliche Verzögerung wirkt. Dann stellt sich jedoch die Frage, wo die viel stärkere Erwärmung bleibt, die mit dem seitherigen CO_2-Anstieg einhergehen sollte. Argumentiert man hingegen mit einer grossen zeitlichen Verzögerung der Erwärmung, dann kann der vor 1940 erfolgte Temperaturanstieg nur wenig mit dem CO_2-Anstieg zu tun haben. Die effektiv dem CO_2 anzulastende Erwärmung wäre somit noch viel kleiner.

Die Datensätze zeigen eine Variation der globalen Temperaturmittel von etwa 1 °C. Dies gilt von Jahr zu Jahr, aber auch über Jahrzehnte und möglicherweise auch über die gesamte Messperiode von etwas über 100 Jahren. Es scheint höchst fraglich, ob angesichts dieser Variation von einem von 0 verschiedenen Trend gesprochen werden darf (R. Lindzen 1990).

Die Klimamodelle sagen für die polaren Gebiete eine 2- bis 4mal grössere Erwärmung voraus als für die gemässigten und niederen Breiten. Für das Gebiet der atlantischen Arktis fand J. Rogers (1989) jedoch einen markanten Temperaturanstieg während den Jahren 1920–1935 und seither eine ebenso starke Abkühlung!

Alle diese Tatsachen lassen Zweifel an der Ursache der globalen Erwärmung bestehen. Wie jedoch würde die globale Erwärmung weitergehen, wenn die gesamte Erwärmung der letzten 100 Jahre dem Anstieg der Treibhausgase angelastet werden müsste? Dies lässt sich aufgrund der Angaben von V. Ramanathan (1988) und dem bisherigen Anstieg von 0,3–0,6 °C abschätzen. Die CO_2-Verdoppelung führt demnach zu einer schlussendlichen Erwärmung von etwa 0,8–1,5 °C. Bei ungebremstem Verbrauch der fossilen Brennstoffe wurde ein CO_2-Anstieg auf maximal das vierfache des Wertes zu Beginn des Jahrhunderts vorausgesagt. Die fossilen Brennstoffe wären danach aufgebraucht. Aufgrund der logarithmischen Abhängigkeit der Temperatur von der CO_2-Konzentration lässt sich somit der

maximal mögliche (bei 4 x CO_2) globale Temperaturanstieg auf etwa 1,8–3,5 °C schätzen.

Die Untersuchungen an den Wostok-Eisbohrkernen werden oft als Beweis genannt für die Wirksamkeit des Treibhauseffektes (H. Oeschger 1990, IPCC1 1990).

Diese belegen einen ähnlichen Verlauf der atmosphärischen CO_2-Konzentration und der antarktischen Temperatur während den letzten Eiszeit-Warmzeit-Zyklen. V. Ramanathan (1988) äussert allerdings Zweifel, weil der CO_2-Unterschied zwischen Eiszeit und Warmzeit nur etwa 90 ppm beträgt, die globale Temperaturänderung jedoch etwa 5 °C, was wesentlich mehr ist, als selbst aufgrund der extremsten Modellberechnungen zu erwarten wäre. Ausserdem sank die antarktische Temperatur zu Beginn der letzten Eiszeit, vor ca. 130 000 Jahren, während etwa 17 000 Jahren kontinuierlich um etwa 8 °C, die CO_2-Konzentration jedoch blieb praktisch konstant bei ca. 275 ppm. Erst während dem folgenden Temperaturabfall um ca. 1 °C sank auch die CO_2-Konzentration auf ca. 240 ppm. Allenfalls könnte somit diese Phase des Temperaturabfalls durch den CO_2-Abfall verursacht worden sein, wie dies der Treibhaustheorie entsprechen würde. Dies ist jedoch wenig überzeugend, weil der Temperaturabfall schon lange vor dem CO_2-Abfall einsetzte und im Temperaturverlauf keinerlei Anzeichen eines Unterbruchs zu beobachten ist. Auch der Anstieg der Temperatur am Ende der letzten und der vorletzten Eiszeit, vor ca. 15 000 bzw. 145 000 Jahren, begann jeweils ca. 500–1000 Jahre vor dem CO_2-Anstieg.

Die Klimamodelle werden somit von den Daten kaum bestätigt und diese zeigen keine über die natürliche Variation hinausgehende Änderung der globalen Mitteltemperatur. Diese Tatsachen belegen, dass allfällig zu erwartende Klimaänderungen kleiner sein müssen als bisher vorausgesagt wurde. Viele Fachleute halten höchstens einen Temperaturanstieg am unteren Ende des von Modellen berechneten Bereiches für möglich. Damit wären die Befürchtungen betreffend deren Folgen weitgehend unbegründet.

Eine der am meisten genannten Folgen wäre der Anstieg des Meeresspiegels infolge des Abschmelzens der polaren Eiskappen. In den polaren Gebieten ist bisher allerdings keinerlei Anstieg der Temperatur nachzuweisen. Neuere Arbeiten haben zudem das Ausmass eines möglichen Meeresspiegelanstiegs wesentlich reduziert. M. Meier (1990) berichtet, dass an einer Konferenz der Meeresspiegelanstieg bei einer globalen Erwärmung von 3- bis 5 °C neu abgeschätzt wurde. Als z.Z. beste Schätzung wird ein Wert von 35 ± 40 cm angegeben.

4 CO_2-Anstieg und Pflanzenwachstum

Aufgrund der von den Modellen vorhergesagten Klimaänderungen sind für die Land- und Forstwirtschaft grosse Probleme angekündigt worden (S.H. Schneider 1989, M. Parry et al. 1988). Die mittlere Erwärmung der Erde um 1,5 °C bis 4,5 °C, die in höheren Breiten noch ausgeprägter sein soll, würde demnach die Vegetation stark beeinflussen. Einige Arten könnten bei den höheren Temperaturen nicht mehr überleben, sie würden durch andere Arten verdrängt. Ausserdem wird behauptet,

die höheren Temperaturen würden zu grösserer Verdunstung und erhöhten Atmungsverlusten führen und beides würde das Wachstum reduzieren. Die verminderten Niederschläge könnten das Wachstum zusätzlich verringern. Die höheren Temperaturen sollen auch Krankheiten und Schädlinge begünstigen und dadurch grössere Ernteverluste zur Folge haben. Während bei landwirtschaftlichen Kulturen eine rasche Umstellung auf andere Sorten oder gar Arten möglich ist, könnten sich die Wälder und andere naturnahe Pflanzengemeinschaften nicht so rasch adaptieren.

Der Grund für diese negative Beurteilung der Klimaänderungen ist in der Ungewissheit über das Verhalten der Arten naturnaher Pflanzenbestände wie Wälder, Naturrasen, Moore usw. zu suchen. In allen Pflanzengemeinschaften dieser Formationen gedeihen mehrere, oft viele Pflanzenarten neben- und miteinander. Sie alle besitzen bezüglich der verschiedenen Umweltsfaktoren physiologische Existenzminima, -optima und -maxima. Bei den einen ist die Spanne breit, bei anderen sehr eng. Aus ihren physiologischen Ansprüchen und den gegebenen Umweltsbedingungen hat sich unter dem herrschenden Klima ein Gleichgewicht herausgebildet. Dieses beruht auf dem ökologischen Verhalten der Arten, bei dem die konstitutionsbedingte Konkurrenzkraft der Arten oder aber ihre Nischenfunktion eine Rolle spielen. Durch die vorhergesagten Temperaturerhöhungen, die möglicherweise mit Niederschlagsverminderungen einhergehen, könnte das ökologische Gleichgewicht der Ökosysteme empfindlich gestört werden, indem die einzelnen Arten ihr Verhalten verändern. Nun ist aber zu beachten, dass sich bei höherer CO_2-Konzentration die physiologischen Reaktionen der Pflanzen erheblich verändern, und zwar gerade in bezug auf deren Temperatur und Wasseransprüche. Die CO_2-Zunahme führt bei C3-Arten (Erklärung dazu Abschnitt 4.1) zu einem Anstieg des Temperaturoptimums des Wachstums und bei allen Arten zu einer Reduktion des Wasserverbrauchs. Diese Veränderungen sind bei einer CO_2-Verdoppelung so gross, dass ihre Vernachlässigung zu völlig falschen Ergebnissen führt, und dies unabhängig davon, ob Klimaänderungen betrachtet werden oder nicht.

Nach wie vor kennen wir aber die Reaktionen unserer einheimischen Wildpflanzen, insbesondere auch Gehölzen, auf die vorausgesagten Klimaänderungen nicht. Die Arten der Natur sind genetisch nicht einheitlich, wie dies bei Kulturpflanzen oft der Fall ist, sondern es handelt sich um Populationen, aus denen durch Umweltsveränderungen eine neue Auslese stattfinden kann. Dadurch wohnt naturnahen Lebensgemeinschaften eine gewisse Pufferwirkung inne, so dass die Arten in ihrer Existenz nicht notgedrungen gefährdet sind. Doch sind durch die Erbgutauslese bedingt die neuen Konkurrenzbedingungen und -ergebnisse nicht abzusehen. Zu bedenken ist schliesslich nicht nur der Gas- und Stoffwechsel, sondern auch die Tatsache, dass viele Wildpflanzen, insbesondere Bäume und Sträucher, ohne Symbiosen (z. B. mit Mykorrhiza) nicht gedeihen können. Wie sich aber die CO_2-Zunahme oder Klimaänderungen darauf auswirken, ist derzeit gänzlich unbekannt. Völlig untauglich in der Beurteilung der Klimaänderungen sind jedenfalls lineare parallele Höhenverschiebungen von Pflanzenformationen, wie man sie aus der Pflanzengeographie kennt. Da gleiches Verhalten der beteiligten Pflanzenarten auf

äussere Veränderungen nicht zu erwarten ist, wird sich auch die Gemeinschaftsstruktur nicht linear verändern.

Bezüglich der Reaktionen von Ökosystemen bestehen somit grosse Wissenslükken. Die physiologischen Reaktionen der Pflanzen und einfachen Pflanzenbestände sind jedoch gut studiert. Details findet der Leser bei E. Lemon (1983), B. Strain and J. Cure (1985), S. Idso (1989) und B. Kimball (1990).

4.1 CO_2-Anstieg und Photosynthese

Schon seit etwa 100 Jahren ist bekannt, dass höhere CO_2-Konzentrationen das Pflanzenwachstum fördern, und dies wurde seither in vielen Gewächshäusern, durch künstliche CO_2-Anreicherung («CO_2-Düngung»), ausgenützt. Seit Jahrzehnten wurden zudem Hunderte wissenschaftlicher Untersuchungen über die Auswirkungen höherer CO_2-Konzentration durchgeführt.

In Bild 1 sind Photosyntheseraten von Tomatenblättern für zwei CO_2-Konzentrationen und verschiedene Temperaturen dargestellt, in Abhängigkeit der photosynthetisch aktiven Strahlung (400–700 nm). Bei 300 ppm CO_2 (gestrichelte Kurven) zeigen sich die typischen Sättigungskurven. Man sieht folgende Auswirkungen höherer CO_2-Konzentration (diese ist nicht angegeben, vermutlich >1000 ppm):

- Bei niedriger Temperatur (12,5 °C) hat der CO_2-Anstieg praktisch keine Konsequenzen.
- Bei 21 °C ist etwa eine Verdoppelung der Photosyntheserate festzustellen, während bei 300 ppm der Temperaturanstieg von 12,5 auf 20,5 °C nur eine geringe Verbesserung bringt.
- Ein weiterer Temperaturanstieg auf 31 °C bringt nochmals einen starken Anstieg der Photosynthese (während dies bei 300 ppm kaum mehr der Fall wäre).
- Bei hoher CO_2-Konzentration und hohen Temperaturen zeigen die Kurven noch keine Lichtsättigung. Die Pflanzen können somit auch noch höhere Bestrahlungsstärken ausnützen.
- Die Pflanzen können bei allen Lichtverhältnissen von der höheren CO_2-Konzentration profitieren.

Dieses Verhalten gilt keineswegs nur für die Tomaten, sondern es ist typisch für die sog. C3-Pflanzen, zu denen bei uns fast alle einheimischen Arten gehören und auch weltweit machen sie den grössten Teil der Arten aus. Als Primärprodukte der CO_2-Fixierung entstehen bei C3-Pflanzen C3-Zuckerphosphate (sie enthalten 3 C-Atome) und bei C4-Pflanzen C4-Säuren. C4-Pflanzen zeichnen sich im Vergleich zu C3-Pflanzen durch eine erhöhte Affinität bezüglich CO_2 aus. Dadurch können sie niedrige CO_2-Konzentrationen besser ausnützen als die anderen Arten. Sie sind deshalb bei heutigen CO_2-Konzentrationen besonders leistungsfähig. C4-Pflanzen, zu ihnen gehört z. B. der Mais, zeigen meistens einen geringeren Anstieg der Photosyntheserate. Bei vielen C3-Arten ist ein Anstieg der Photosyntheserate bis etwa 1000 bis 1500 ppm CO_2 festzustellen, oberhalb dieses Wertes tritt dann eine

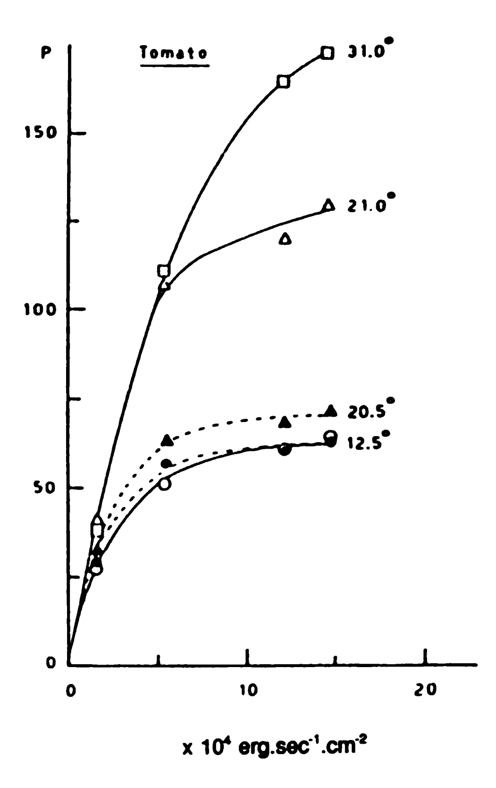


Bild 1 Netto-Photosyntheserate von Tomatenblättern in Abhängigkeit der photosynthetisch aktiven Strahlung (400–700 nm) (1 mmol $m^{-2} s^{-1}$ = 21.3 10^4 erg $cm^{-2} s^{-1}$), bei 300 ppm CO_2 (gestrichelte Linien) und bei einer höheren CO_2-Konzentration (>1000 ppm; ausgezogene Linien), bei verschiedenen Blattemperaturen (aus Enoch und Kimball 1986).

Fig. 1 Photosynthesis rate (P, in mol CO_2 $m^{-2} s^{-1}$) of tomato leaves in relation to photosynthetic active radiation, at 300 ppm CO_2 (dashed lines) and at a higher CO_2 concentration (>1000 ppm) at different leaf temperatures (°C).

«Sättigung» ein. Andere Arten setzen den Anstieg auch noch zu höherer CO_2-Konzentration hin fort. Die höhere Photosyntheserate kommt z. T. durch eine *geringere Photorespiration* zustande.

In Bild 2 ist die Temperaturabhängigkeit der Photosyntheserate für eine C3- und eine C4-Art dargestellt (zitiert von R. Pearcy and O. Björkman in E. Lemon 1983). Bei 330 ppm weist die C4-Art eine wesentlich höhere Photosyntheserate auf. Bei 1000 ppm jedoch ist die C3-Art der C4-Art sogar überlegen. Dies belegt eindrücklich den limitierenden Effekt der niedrigen (heutige) CO_2-Konzentrationen auf C3-Pflanzen. Die Zunahme der Photosynthese wächst mit steigender Temperatur. Es ist auch sehr deutlich die Verschiebung des Temperaturoptimums zu sehen. Bei der C3-Art führt somit die Verdreifachung der CO_2-Konzentration zu einem Anstieg des Temperaturmaximums um ca. 5 °C. Bei der C4-Art ist keine solche Verschiebung festzustellen. Die C3-Pflanzen können bei steigender CO_2-Konzentration nicht nur generell mehr leisten, höhere Temperaturen wirken sich sogar noch positiv aus! Es handelt sich bei der in Bild 2 dargestellten Art um eine wärmeliebende Pflanze, die in gemässigten Breiten heimischen C3-Arten zeigen jedoch nzipiell das gleiche Verhalten, die Kurven sind lediglich zu niedrigeren Tempeuren verschoben.

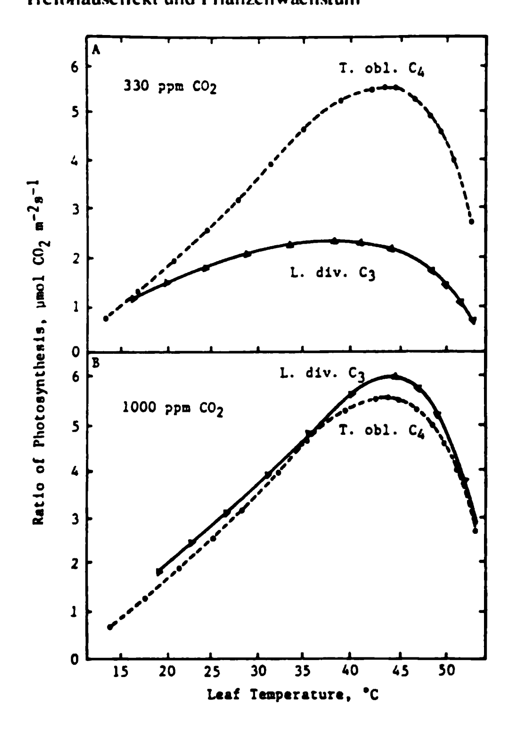


Bild 2 Temperaturabhängigkeit der Photosyntheserate von *Larrea divaricata* (C3) und *Tidestromia oblongifolia* (C4) bei 330 (A) und 1000 (B) ppm CO_2 (aus Lemon 1983)

Fig. 2 Temperature dependence of CO_2 uptake at (A) 330 ppm CO_2 and (B) 1000 ppm for *Larrea divaricata* (C3) and *Tidestromia oblongifolia* (C4) (from Lemon 1983)

Das Wachstum der Pflanzen ist jedoch nicht nur von der Photosyntheserate abhängig. Bekanntlich nimmt die relative Wachstumsrate im Verlauf des Wachstums ab, u. a. weil sich die Pflanzenteile gegenseitig immer mehr beschatten. Blätter, die nicht mehr optimale Lichtverhältnisse haben, zeigen jedoch eine verringerte Photosyntheserate. Das verstärkte Wachstum bei CO_2-Erhöhung führt zu einer Beschleunigung dieses Effekts und damit zu einer Reduktion des Vorteils. Bei erhöhter CO_2-Konzentration ist auch die Dunkelatmung grösser, weil sehr viel mehr Kohlenhydrate umgesetzt und transloziert werden müssen. Dadurch wird der Vorteil der höheren Photosyntheserate ebenfalls teilweise reduziert.

Als wichtigen wachstumslimitierenden Prozess, bei hoher CO_2-Konzentration, beschrieben U. Scheidegger und J. Nösberger (1984) die Produktehemmung der Photosynthese. Die Pflanze kann die hohe Photosyntheserate nur aufrechterhalten, wenn die Produkte (Kohlenhydrate) für das Wachstum verwendet oder als Reservestoffe eingelagert werden können. Übersteigt die Produktion von Assimilaten (source) die Nachfrage (sink), so muss die Pflanze die Photosyntheserate reduzieren. Das grosse Potential der Photosynthese bei hoher CO_2-Konzentration kann somit nur ausgenützt werden, wenn entsprechende Assimilatesinks vorhanden sind. Diese Reduktion der Photosynthese auf Werte nahe bei den heutigen Werten wird beobachtet, wenn andere Faktoren das Wachstum limitieren, so z. B.:

– bei niedrigen Temperaturen. Dabei kann schon bei der heutigen CO_2-Konzentration Produktehemmung auftreten. Deshalb ist in Bild 1 bei 12 °C kein

Effekt der CO_2-Erhöhung festzustellen. Bei niedrigen Temperaturen ist eine starke Wachstumssteigerung durch CO_2-Erhöhung vor allem bei Vegetationsbeginn zu erwarten, wenn die Bildung von Blättern und Reserveorganen einen gesteigerten sink darstellen.
- Bei eingeschränktem Wurzelwachstum, wenn Pflanzen z. B. in Töpfen wachsen (dies ist bei Laboruntersuchungen oft der Fall) oder im Gebiet des Permafrostes (Tundra).
- Wenn die Pflanze ihre maximale Grösse erreicht hat und das Wachstum einstellt.

Das Einsetzen der Produktehemmung wird öfters als (irreversible) Anpassung des Photosyntheseapparates an die erhöhte CO_2-Konzentration gedeutet und es wird behauptet, die Pflanzen verlören dadurch die Möglichkeit vom CO_2-Anstieg zu profitieren. Dies ist jedoch nicht der Fall, denn sobald die Wachstumslimitierung aufgehoben wird, zeigt sich auch wieder die erhöhte Photosynthese.

In einer Analyse von mehreren Hundert vorgängigen Untersuchungen, mit vielen verschiedenen Arten, hat B. Kimball (1983) eine durchschnittliche Ertragszunahme um 33 % ermittelt, für eine CO_2-Zunahme von 330 auf 660 ppm. Die meisten betrafen Wachstumsversuche in Gewächshäusern mit landwirtschaftlich wichtigen Arten, wie z. B. Weizen, Gerste, Reis, Soja, Mais, Sorghum. Die publizierten Daten zeigen eine grosse Variation dieser Zunahme (bei C3-Pflanzen ca. 25–100 %), sowohl zwischen den Arten als auch innerhalb derselben. Diese Unterschiede sind jedoch z. T. bedingt durch die unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Temperatur, Topfversuche).

Seit etwa 10 Jahren sind Begasungsversuche im Freien durchgeführt worden. Meistens werden dazu geschlossene und klimatisierte Begasungskammern eingesetzt, aber auch open-top Kammern, in denen naturnahe Bedingungen herrschen. Diese Versuche haben die oben genannten Effekte vollumfänglich bestätigt, insbesondere die Wachstumssteigerung um 25–100 % und den wachstumsfördernden Effekt steigender Temperatur. (Viele dieser Versuche werden ausführlich beschrieben in der Serie von «greenbooks»: Response of Vegetation to Carbon Dioxide, US Department of Agriculture, ARS, Washington DC 20250.) Seit 2 Jahren werden Versuche mit Freilandbegasungen grösserer Parzellen (22 m Durchmesser) von Baumwolle durchgeführt, in denen die Ergebnisse der anderen Methoden bestätigt wurden (B. Kimball, pers. Mitteilung). Auch Bäume sind untersucht worden, wobei ebenfalls Wachstumszunahmen von 20–120 % gefunden wurden (D. Eamus and P. Jarvis 1989), die Untersuchungen erstrecken sich jedoch erst auf wenige Jahre. Das gleiche Verhalten wurde auch bei Ökosystemen gefunden (L. Ziska et al. 1990).

Verschiedene Forscher haben sich mit den Auswirkungen des CO_2-Anstiegs der vergangenen Jahrzehnte auf das Pflanzenwachstum befasst. Übereinstimmend wird ein beträchtlicher Anteil der Produktionssteigerungen landwirtschaftlicher Kulturpflanzen dem CO_2-Anstieg zugeschrieben (z. B. L.H. Allen et al. 1987). Untersuchungen der Jahrringe von Bäumen haben ebenfalls und z. T. dramatische Wachs-
[…]nszunahmen ergeben, die nicht auf lokale Witterungseinflüsse zurückgeführt […]den konnten (V. LaMarche et al. 1984). Während der Vegetationsperiode […]eren die Pflanzen sehr viel CO_2, im Winter jedoch überwiegt die CO_2-Freiset-

zung. Deshalb variiert der CO_2-Gehalt der Atmosphäre in der bekannten Weise mit den Jahreszeiten. Die beobachtete Zunahme dieser Variation seit Beginn der CO_2-Messungen (1954) konnte bisher nur mit der Wachstumszunahme der Vegetation erklärt werden (I.G. Enting, 1987).

Die Zunahme des Wachstums äussert sich auf vielfältige Weise, wobei jedoch nicht alle Merkmale gleichzeitig auftreten müssen:
- durch eine Zunahme der Blattfläche
- durch ein grösseres Höhenwachstum
- durch mehr Triebe oder Äste
- durch dickere Blätter
- durch mehr und grössere Blüten
- durch mehr und grössere Früchte
- durch ein grösseres Wurzelwerk

Manchmal führt dieses stärkere Wachstum auch zu einer früheren Reife der Pflanze, in einigen Fällen jedoch findet man eine verzögerte Seneszenz.

4.2 CO_2-Anstieg und Transpiration

Die Spaltöffnungen (Stomata) in den Blättern dienen einerseits der CO_2-Aufnahme und anderseits verdunstet durch sie viel Wasser. Bei steigender CO_2-Konzentration verengen sich die Stomata und dadurch wird die Transpiration herabgesetzt. Interessant ist, dass diese Stomatareaktion auch bei C4-Pflanzen auftritt und sogar i. a. stärker ist als bei C3-Pflanzen. Auch dieser Effekt ist schon lange bekannt und vielfach untersucht worden. B. Kimball und S. Idso (1983) ermittelten eine mittlere Reduktion der Transpiration von 34 %, bei einer CO_2 Zunahme von 330 auf 660 ppm. Bei einem weiteren CO_2-Anstieg nimmt dieser Wert bis weit über 1000 ppm hinaus zu.

Die Abnahme der Transpiration mit steigender CO_2-Konzentration führt ebenfalls zu einer Wachstumszunahme, wenn das Wasserangebot zeitweise oder dauernd limitierend wirkt. Bei ungenügendem Wasserangebot oder bei Wachstumsbedingungen, die einen hohen Wasserverbrauch der Pflanzen bedingen, so etwa bei warmem, trockenem Wetter mit hoher Sonneneinstrahlung, verengen sich die Stomata und die Pflanze schützt sich dadurch vor dem Austrocknen. Dadurch wird die Photosynthese und das Wachstum jedoch ebenfalls reduziert. Bei erhöhter CO_2-Konzentration ist die Transpiration verringert und infolgedessen tritt kein oder ein geringerer Wasserstress auf. Dadurch können die Pflanzen die optimalen Wachstumsbedingungen ausnützen, was zu einer erheblichen Wachstumszunahme führen kann.

Die Zunahme des Wachstums und insbesondere der Blattfläche kann, bei genügender Wasserversorgung und trotz reduzierter Transpiration, zu einer Zunahme der pro Flächeneinheit gemessenen Verdunstung führen. Dies kann bei C3-Arten den oben genannten Vorteil der reduzierten Transpiration ganz oder teilweise aufheben. Dies ist jedoch nur bei krautigen Beständen der Fall, die so dicht sind, dass der aerodynamische Widerstand viel grösser ist als der stomatäre Widerstand (Y. Shaer and C. van Bavel 1987). Die Vergrösserung des stomatären Widerstandes

fällt dann kaum ins Gewicht. Bei Baumbeständen dagegen (Wälder) ist der aerodynamische Widerstand klein und die Vergrösserung des stomatären Widerstandes wirkt sich viel stärker auf den Wasserverbrauch aus. Wälder können somit von diesem Effekt besonders stark profitieren (F. Woodward 1990). Bei C4-Pflanzen jedoch wird die Photosynthese nicht stark erhöht, deshalb wirkt sich dieser Effekt bei ihnen besonders stark aus. Bei Mais wurde z. B. eine Wachstumszunahme um ca. 50 % gefunden, die vor allem auf diesen Effekt zurückzuführen ist (H. Rogers et al. 1983).

In weiten Gebieten der Erde wird das Pflanzenwachstum durch das Wasser limitiert. Dies ist auch in unseren Regionen zeitweise der Fall (Jura, Wallis, Tessin). Der Einfluss steigender CO_2-Konzentration lässt sich unter diesen Bedingungen am einfachsten mit der Grösse «water use efficiency» (WUE) beschreiben. Dies ist der Quotient aus produzierter Trockenmasse und verbrauchter Wassermenge. Verschiedene Arbeiten haben gezeigt, dass die WUE sich etwa verdoppelt, bei CO_2-Zunahme von 330 auf 660 ppm. Die Folge davon ist, dass mit einer bestimmten Menge verfügbaren Wassers der Pflanzenertrag sich etwa verdoppelt. Erstaunlich ist die Konstanz dieses Wertes, der auch für C4-Pflanzen zu gelten scheint. Die WUE nimmt mit weiter steigender CO_2-Konzentration ebenfalls weiterhin zu. Einmal mehr erweist sich der CO_2-Anstieg als äusserst positiv, selbst für die Trockengebiete der Erde, die demnach sogar in *relativ* stärkerem Mass profitieren können.

4.3 Weitere Auswirkungen steigender CO_2-Konzentration

Durch die Reduktion der Transpiration wird weniger eingestrahlte Energie in latente Wärme umgesetzt, die Folge sind höhere Blattemperaturen, die wiederum zu erhöhter Photosyntheserate führen. Man könnte vermuten, dass durch die Zunahme der Blattemperatur auch die Gefahr der Hitzeschädigungen der Blätter zunehmen würde. Dies ist aber nicht der Fall, die Pflanzen werden sogar widerstandsfähiger gegen Wärmestress. Eine wichtige Frage ergibt sich im Hinblick auf die Nährstofflimitierung vieler natürlicher Standorte. Können Pflanzen, die unter limitierter Nährstoffversorgung leben, von der höheren CO_2-Konzentration überhaupt profitieren? Mehrere Arbeiten haben sich mit N- und P-Mangel befasst und es wird übereinstimmend berichtet, dass der wachstumsstimulierende Effekt höherer CO_2-Konzentrationen auch unter diesen Bedingungen zutage tritt. Die Zunahme des Wachstums ist sogar oft *relativ* grösser als unter nichtlimitierenden Bedingungen. Die biologische Stickstoff-Fixierung ist ein für natürliche Standorte, wie auch für die Landwirtschaft, äusserst wichtiger Prozess. In Symbiose mit Pflanzen lebende Bakterien fixieren dabei Luftstickstoff und stellen diesen der Pflanze zur Verfügung. Übereinstimmend wird eine Zunahme der N-Fixierungsrate um einen Faktor 3–5 gefunden. Das verstärkte Pflanzenwachstum äussert sich besonders ausgeprägt in einer Zunahme des Wurzelwachstums. Dadurch wird [illegible] die Aktivität der Bodenmikroorganismen erhöht. Eine detaillierte Diskussion [illegible] umfangreichen Literatur zu diesen Prozessen findet sich bei S. Idso (1989).

5 Schlussfolgerungen

Die positiven Auswirkungen des CO_2-Anstiegs auf das Pflanzenwachstum sind experimentell gut untersucht und eindeutig belegt. Die wichtigsten Reaktionen sind:

- ein ins Gewicht fallender Anstieg der Photosyntheserate
- eine ebenso starke Reduktion der Transpiration

Beide Effekte führen zu einer beträchtlichen Wachstumssteigerung bei C3- und C4-Pflanzen. Diese ist nicht begrenzt auf Gebiete mit genügender oder guter Wasser- und Nährstoffversorgung, im Gegenteil, sie wirkt sich bei limitierenden Wachstumsbedingungen sogar noch relativ stärker aus. Dies lässt den Schluss zu, dass die steigende CO_2-Konzentration der Atmosphäre *überall* zu einer starken Zunahme des pflanzlichen Wachstums führen wird und vielleicht sogar zu einer teilweisen Begrünung heutiger Steppen und Wüsten.

Auch die Landwirtschaft und die Forstwirtschaft werden von den steigenden Erträgen in hohem Masse profitieren. Verschiedene Forscher sind der Überzeugung, dass gerade der steigende CO_2-Gehalt der Atmosphäre ein wichtiger Beitrag zur Lösung des Welternährungsproblems darstellt. Vom CO_2-Anstieg wird ja nicht nur die hochentwickelte Landwirtschaft in den Industrieländern profitieren, sondern ebensosehr die Bauern der Entwicklungsländer, die sich die hohen Kosten für die ertragssteigernden Düngemittel kaum leisten können.

Die wachstumsfördernden Wirkungen des CO_2-Anstiegs würden sich auch unter veränderten Klimabedingungen auswirken. Ja, sie würden bei mässig steigenden Temperaturen (1,5–2,5 °C) sogar noch stärker ins Gewicht fallen. Dies ist die Folge des Anstiegs des Temperaturmaximums der Photosyntheserate. Selbst die extremen Temperaturzunahmen, wie sie von den Klimamodellen für einige Gebiete der USA vorhergesagt werden (4–5 °C), würden die wachstumsfördernden CO_2-Effekte für die Pflanzen nur gerade ausgleichen (R. Adams et al. 1990, R. Curry et al. 1990). Eine Zunahme der Niederschläge würde Mehrerträge ergeben, während verminderte Niederschläge massive Ertragseinbussen zur Folge hätten, so dass vermehrt bewässert werden müsste. Alle diese Effekte nehmen mit steigender CO_2-Konzentration auch über die CO_2-Verdoppelung hinaus zu, mindestens bis zum maximal möglichen vierfachen CO_2-Gehalt.

Ohne Zweifel, die Fragen um den CO_2-Anstieg und die dadurch eventuell ausgelösten Klimaänderungen sind komplex und noch nicht befriedigend beantwortet. Sollen deshalb die CO_2-Emissionen vorsorglicherweise reduziert werden? Diese Frage ist sehr umstritten. Es gibt sicher gute Gründe für diese Forderung. Das masslose Verbrennen der fossilen Brennstoffe, die ja eben nicht nur Brennstoffe, sondern auch wichtige Rohstoffe für die Wirtschaft sind und auch zukünftigen Generationen zur Verfügung stehen sollten, erscheint immer mehr als verantwortungslos. Gewisse Einsparungen in den Industrieländern, die ja den grössten Teil des Weltkonsums an fossilen Brennstoffen beanspruchen, sollten ohne katastrophale ökonomische Folgen möglich sein. Anderseits ist ein Anheben des Lebensstandards in den Entwicklungsländern von äusserster Dringlichkeit. Neben humanistischen Gesichtspunkten spricht auch die Sorge um die Erhaltung des Friedens unter

den Völkern für diese Forderung. Mit äusserster Dringlichkeit jedoch stellt sie sich vor dem enormen Problem der Eindämmung des Bevölkerungswachstums in den Entwicklungsländern. Die Hebung des Lebensstandards hat sich bisher als einziger Weg zur Reduktion der Geburtenziffern erwiesen, jedenfalls in freien Gesellschaften. Ein höherer Lebensstandard jedoch ist ohne Zunahme des Energiekonsums kaum vorstellbar. Alternative und vor allem erneuerbare Energieformen sind sicher langfristig die einzige Möglichkeit zur Lösung dieses Problems, in den nächsten Jahrzehnten jedoch müssen auch die bekannten Energiequellen, und das bedeutet auch die fossilen, dafür benutzt werden. Die Forderung nach einer *globalen* Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger führt unweigerlich zu einer weiteren Bevölkerungszunahme mit langfristig katastrophalen menschlichen, politischen und ökologischen Folgen. Diese könnten weit gravierender sein als selbst diejenigen der prognostizierten Klimaänderungen. Dies umso mehr, als der Treibhauseffekt kaum im befürchteten Ausmass zu Klimaänderungen führen wird, dafür gibt es überhaupt keine gesicherten Anzeichen. Der CO_2-Anstieg lässt im Gegenteil ausserordentlich positive Auswirkungen auf die gesamte Vegetation der Erde erwarten und sogar in verstärktem Mass, wenn ein mässiger Temperaturanstieg erfolgen würde. Der steigende CO_2-Gehalt der Atmosphäre erscheint als der einzige Weg, um die unausweichlichen Probleme des nächsten Jahrhunderts, nämlich die Beschränkung der Bevölkerungszunahme und die Ernährung der Menschheit, auf friedliche Weise zu lösen. Dies muss allerdings begleitet werden von einem sparsamen und ökologisch verantwortbaren Umgang mit den Ressourcen und einer Weltwirtschafts- und Finanzpolitik, die den Entwicklungsländern überhaupt erst eine Chance zu ihrer Entwicklung gibt.

Es ist offensichtlich, dass die Chancen und Risiken des CO_2-Anstiegs und der Klimaänderungen nur durch die Zusammenarbeit aller betroffener Fachleute sinnvoll abgeschätzt werden können. Diese Zusammenarbeit braucht Zeit, aber es besteht kein Anlass zu überstürztem Handeln![1]

6 Literatur

Adams, R.M., Rosenzweig, C., Peart, R.M., Ritchie, J.T., McCarl, B.A., Glyer, J.D., Curry, R.B., Jones, J.W., Boote, K.J. and Allen Jr. L.H., 1990. Global Climate Change and US Agriculture. Nature *345*, 219–24.

Allen, L.H., Boote, K.J., Jones, J.W., Jones, P.H., Valle, R.R., Acock, B., Rogers, H.H. and Dahlman, R.C. 1987. Response of vegetation to rising carbon dioxide: Photosynthesis, biomass, and seed yield of soybean. Global Biogeochem. Cycles *1*, 1–14.

Bryson, R.A. 1989. Will There be a Global «Greenhouse» Warming? Envir. Cons. *16*, 97–9.

Cess, R.D. et al. 1990. Intercomparison and Interpretation of Climate Feedback Processes in 19 Atmospheric General Circulation Models. J. Geophys. Res. *95* (D10), 16 601–15.

Curry, R.B., Peart, R.M., Jones, J.W., Boote, K.J. and Allen, L.H. 1990. Simulation as a tool for analyzing crop response to climate change. Trans. ASAE *33* (3), 981–90.

[1] ...ollegen der Arbeitsgruppe Agrar- und Forstmeteorologie in der Schweiz sei für anregende ...e Diskussionen, ohne die diese Arbeit vielleicht nicht geschrieben worden wäre, herzlich ... N. Kuhn, WSL, gebührt der Dank für einen wertvollen Beitrag zu den Reaktionen von ...

Eamus, D. and Jarvis, P.G. 1989. The Direct Effects of Increase in the Global Atmospheric CO_2 Concentration on Natural and Commercial Temperate Trees and Forests. Adv. Ecological Res. *19*, 1–55.

Elsaesser, H.W., MacCracken, M.C., Walton, J.J. and Grotch, S.L. 1986. Global Climatic Trends as Revealed by the Recorded Data. Rev. Geophys. *24* (4), 745–92.

Enoch, H.Z. and Kimball, B.A. 1986. Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops. Vol. 1: Status and CO_2 Sources. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida.

Enting, I.G. 1987. The interannual variation in the seasonal cycle of carbon dioxide concentration at Mauna Loa. J. Geophys. Res. *92*, 5497–504.

Idso, S.B. 1989. Carbon Dioxide and Global Change: Earth in Transition. IBR Press, Tempe, Arizona.

IPCC1 1990. Scientific Assessment of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Report of Working Group 1, WMO, UNEP

Karl, T.R., Tarpley, J.D., Quayle, R.G., Diaz, H.F., Robinson, D.A. and Bradley, R.S. 1989. The Recent Climate Record: What it can and cannot tell us. Rev. Geophys. *23* (3), 405–30.

Kiehl, J.T. and Ramanathan, V. 1990. Comparison of Cloud Forcing Derived from the Earth Radiation Budget Experiment with that Simulated by the NCAR Community Climate Model. J. Geophys. Res. *95* (D8), 11 679–98.

Kimball, B.A. and Idso, S.B. 1983. Increasing Atmospheric CO_2: Effects on Crop Yield, Water Use and Climate. Agic. Water Manag. *7*, 55–72.

Kimball, B.A. 1983. Carbon Dioxide and Agricultural Yield: An Assessment and Analysis of 430 Prior Observations. Agron. J. *75*, 779–88.

Kimball, B.A. 1990. (Ed.) Impact of Carbondioxide, Trace gases, and Climate Change on Global Agriculture. ASA Special Publication 53. Agronomy Soc. America, Madison, USA.

LaMarche, V.C., Graybill, D.A., Fritts, H.C. and Rose, M.R. 1984. Increasing atmospheric carbon dioxide: Tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation. Science *223*, 1019–21.

Lemon, E.R. (ed.) 1983. CO_2 and Plants. The Response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Carbon Dioxide. AAAS Selected Symposium 84. Westview Press Inc. Boulder, Colorado.

Lindzen, R.S. 1990. Some Coolness Concerning Global Warming. Bull. Am. Met. Soc. *71* (3), 288–99.

Meier, M.F. 1990. Reduced rise in sea level. Nature *343*, 115–6.

Mitchell, J.F.B., Senior, C.A. and Ingram, W.J. 1989. CO_2 and Climate: a Missing Feedback? Nature *341*, 132–4.

Oeschger, H. 1990. Was wissen wir über den Treibhauseffekt? NZZ Nr. *149*, 30. Juni/1. Juli, 23–4.

Parry, M.L., Carter, T.R. and Konijn, N.T. 1988. The Impact of Climate Variation on Agriculture. Vols. 1 and 2. Kluwer Academic, Norwell.

Platt, C.M.R. 1989. The Role of Cloud Microphysics in High-Cloud Feedback Effects on Climate Change. Nature *341*, 428–9.

Ramanathan, V. 1988. The Greenhouse Theory of Climate Change: A Test by an Inadvertent Global Experiment. Science *240*, 293–9.

Ramanathan, V., Cess, R.D., Harrison, E.P., Minnis, P., Berkstrom, B.R., Ahmed, E. and Hartmann, D. 1989. Cloud Radiative Forcing and Climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment. Science *243*, 57–63.

Rogers, J.C. 1989. In Proceedings of the thirteenth annual climate diagnostics workshop. p. 170. (Prepared by the National Oceanic and Atmospheric Administration, National Technical Information Service, Department of Commerce, Sills Building, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA 22161).

Rogers, H.H., Thomas, J.F. and Bingham, G.E. 1983. Response of Agronomic and Forest Species to Elevated Atmospheric Carbon Dioxide. Science *220*, 428–9.

Scheidegger, U.C. and Nösberger, J. 1984. Influence of Carbon Dioxide Concentration on Growth, Carbohydrate Content, Translocation and Photosynthesis of White Clover. Ann. Botany *54*, 735–42.

Schlesinger, M.E. and Mitchell, J.F.B. 1987. Climate Model Simulations of the Equilibrium Climatic Response to Increased Carbon Dioxide. Rev. Geophys. *25* (4), 760–98.

Schlesinger, M.E. and Zhao, Z. 1989. Seasonal Climatic Changes Induced by Doubled CO_2 as Simulated by the OSU Atmospheric GCM/Mixed-Layer Ocean Model. J. Climate *2*, 459–95.

Schneider, S.H. 1989. Veränderungen des Klimas. Spektrum der Wissenschaft/Scientific American, Nr. 11, Nov.

Schoenwiese, C.D. und Diekmann, B. 1987. Der Treibhauseffekt: Der Mensch ändert das Klima. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.

Shaer, Y.A. and Van Bavel, C.H.M. 1987. Relative Role of Stomatal and Aerodynamic Resistances in Transpiration of a Tomato Crop in a CO_2-Enriched Greenhouse. Agric. Forest Meteorol. *41*, 77–85.

Slingo, A. 1989. Wetter Clouds Dampen Global Greenhouse Warming. Nature *341*, 104.

Slingo, A. 1990. Sensitivity of the Earth's Radiation Budget to Changes in low Clowds. Nature *343*, 4. Jan. 49–51.

Strain, B.R. and Cure, J.D. (eds.) 1985. Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation. US-DOE/ER-0238.

Weare, B.C. 1988. A Comparison of Radiation Variables Calculated in the UCLA General Circulation Model to Observations. J. Climate *1*, 485–99.

Woodward, F.I. 1990. Global Change: Translating Plant Ecophysiological Responses to Ecosystems. Trends Ecol. Evol. *5* (9), 308–11.

Ziska, L.H., Drake, B.G. and Chamberlain, S. 1990. Long-term photosynthetic response in single leaves of a C3 and C4 salt marsh species grown at elevated atmospheric CO_2 in situ. Oecologia *83*, 469–72.

H. Blum, Institut für Pflanzenwissenschaften, ETHZ, CH-8092 Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/4: 207–270

Dauer und Wandel der Lägernflora

Fabian G. Egloff

Das geologisch und landschaftlich vielgestaltige Lägerngebiet (Kantone Aargau und Zürich) weist eine artenreiche Gefässpflanzenflora auf, die einerseits typisch ist für das schweizerische Mittelland und den Nordostjura, andererseits aber lokale Besonderheiten aufweist. Die Landschaft hat während der letzten hundert Jahre intensive Veränderungen durchgemacht, die Einwirkungen auf die Flora zeigen. Mittels älteren Herbarbelegen, Exkursionsnotizen und floristischen Publikationen lässt sich die ehemalige Flora einiger Teilgebiete und Lokalitäten wie auch des ganzen Gebietes teilweise rekonstruieren und mit der heutigen vergleichen. Zudem werden Bedrohungsfaktoren diskutiert und auf Möglichkeiten hingewiesen, die floristische Vielfalt und lokalhistorisch bedeutsame Arten zu erhalten.

Permanence and Change in the Flora of Lägern

The geological and topographical diversity of the region of Lägern (Switzerland, cantons Aargau and Zürich) shows a flora rich of vascular plant species which is typical for the lowland of Switzerland and for the northeastern Jura Mountains on the one side, specific for this region on the other side. The landscape has undergone an intensive change since the turn of the century, which shows an influence

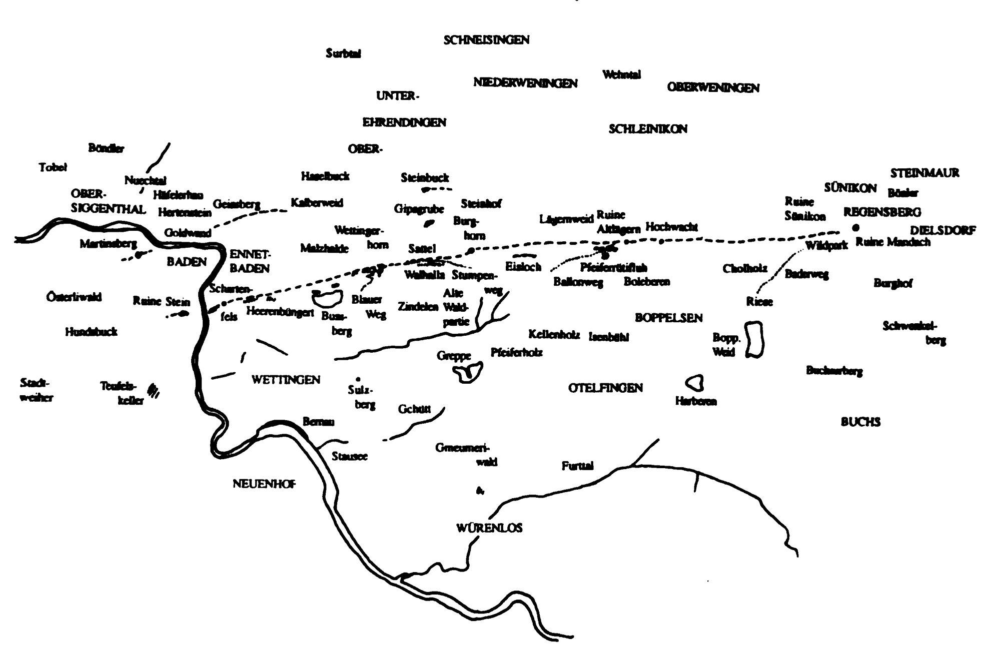


Bild 1 Kartenskizze des Längerngebietes mit den Teilgebieten und Lokalitäten. Die punktierte Linie bedeutet den Längerngrat.

Fig. 1 Map sketch of the region of Lägern with areas and localities. The dotted line means the ridge of Lägern.

on the flora. The past flora of a number of areas and localities and of the whole region is partially reconstructed by the study of old herbaria, excursion notes and of floristical publications, and comparisons with the present state are made. Factors of threats and possibilities for preserving the floristical diversity and the local historic species are debated.

1 Einleitung

Das Lägerngebiet ist durch mehrere Besonderheiten gekennzeichnet, die bestimmenden Einfluss auf die lokale Flora haben: *Geologisch* bildet die Lägern-Antiklinale den östlichsten Ausläufer der Mont-Terrible-Linie des Kettenjuras, der nach Osten unter teilweise von quartärem Moränenschutt überdeckte tertiäre Molasseformationen abtaucht (F. Mühlberg, 1902; G. Senftleben, 1923; R. Notz, 1924; R. Hantke und Mitarbeiter, 1967). Dadurch kommen basische Kalk- neben neutrale bis saure Sandstein- und Moränenböden zu liegen, und eine vielgestaltige Geländemorphologie mit unterschiedlichsten Standortsfaktoren resultiert. Im weiteren ist die in *pflanzengeographischer Hinsicht* interessante Lage hervorzuheben: eine Art Knotenpunkt zwischen mitteleuropäischem und alpin-jurassischem Florengebiet, mit Einstrahlungen atlantischer, pontischer und mediterraner Elemente. Und schliesslich muss die Nähe einwohnerreicher Städte und Agglomerationen erwähnt werden; einerseits erwächst dadurch der Pflanzen- und Tierwelt durch den Zustrom von Erholungssuchenden ein stetig steigender Druck, andererseits bildete die Lägern ein bevorzugtes Exkursionsziel von Fachbotanikern und Pflanzenliebhabern aus der Region, die durch ihre dokumentierten Beobachtungen den historischen Teil der vorliegenden Arbeit – den Florenvergleich zwischen heute und früher – überhaupt erst ermöglicht haben.

Am Fusse der Lägern aufgewachsen, begann ich vor etwa fünfzehn Jahren mit systematischen Beobachtungen, ursprünglich mit dem Ziel, alle Gefässpflanzenarten des Gebietes an ihrem natürlichen Standort kennenzulernen. Insbesondere nach der Entdeckung der phytogeographischen Studie «Das Lägerngebiet» von M. Rikli (M. Rikli, 1907) und später nach dem Bekanntwerden weiterer Quellen mit genauen Fundortsangaben, suchte ich an den vermerkten Lokalitäten gezielt nach den angegebenen Arten, gespannt darauf, ob sie hier, nach Jahren und Jahrzehnten, immer noch aufzufinden seien.

Es ist schon ein besonderes Erlebnis, vor der Population einer im Gebiet seltenen Art zu stehen und zu wissen, dass bekannte Forscher, geschätzte Lehrer und Naturfreunde an *dieser* Stelle *diese* Art vor Jahrzehnten beobachtet haben und dass sich die Art *bis heute* hat halten können. So fand Oswald Heer die Alpen-Gänsekresse *(Arabis alpina)* bei der Burgruine, Nähe Hochwacht, am 25. April 1836 – im gleichen Jahr, als Darwin von der Beagle-Reise zurückkehrte –, und an dieser Stelle kommt sie heute noch vor!

Andererseits stimmt es nachdenklich, wenn aus diesen Quellen hervorgeht, dass im Greppengebiet noch in den fünfziger Jahren viele seltene Orchideenarten, auf den Felsfluren die heute gänzlich aus dem Gebiet verschwundene astlose Graslilie *(Anthericum liliago)* gefunden werden konnten. Da stellt sich die Frage, welchen noch vorhandenen Arten ein gleiches Schicksal droht.

Gewiss, viele interessante Arten und viele die Landschaft bereichernde Biotope sind verschwunden, *aber vieles hat sich bis heute halten können und einiges Wertvolles ist neu.* Es gibt Arten im Gebiet, die wahrscheinlich nur noch an dieser einen Stelle, in einer einzigen Population vorkommen, *aber es gibt sie noch!* Möge die vorliegende Arbeit, die eine alte Tradition lokaler floristischer Beobachtungen weiterführen möchte, dazu beitragen, dass den aus verschiedenen Gründen bemerkenswerten Arten und überhaupt dem ganzen so reichhaltigen Lägerngebiet weiterhin grosse Aufmerksamkeit geschenkt werde. Auch möchte ich hier alle interessierten Leserinnen und Leser bitten, mir eigene, ergänzende Beobachtungen zur Flora einzelner Lokalitäten und deren Wandel zukommen zu lassen, vielleicht können sie später in Form eines Nachtrages publiziert werden.

Danken möchte ich den Herren Willy Bauder, Neuenhof, Albert Bopp, Wettingen, Hans Fenner, Zürich, Ruedi Irniger, Höngg, und Ernst Zumsteg, Wettingen, für Hinweise auf Fundstellen seltener Arten; im weiteren Frau Frieda Birchmeier-Hirt, Zürich, Frau Doris Weber, Baden, Herrn Hans Weber, Visp, und Frau Beatrice Zehnder, Neuenhof, für personelle Angaben zu den in der vorliegenden Arbeit berücksichtigten Pflanzensammlern und Autoren, zudem Herrn Prof. P. Endress für hilfreiche Hinweise.

Besonderen Dank richte ich an Herrn Prof. E. Landolt für wertvolle Angaben, speziell bei kritischen Taxa, und für die Durchsicht des Manuskripts.

Für die Zuwendung eines namhaften Druckkostenbeitrages danke ich dem Amt für Raumplanung, Fachstelle Naturschutz, Zürich, namentlich den Herren F. Hirt und A. Keel.

Und schliesslich danke ich meiner Frau Elisabeth für das entgegengebrachte Interesse und für gelegentliche Ermutigungen; ihr und meinen beiden Töchtern Katja und Isabelle sei diese Arbeit gewidmet.

2 Ziele, Grundlagen und Vorgehen

Die vorliegende Arbeit hat hauptsächlich zum Ziele, die heute vorhandenen, besonders beachtenswerten Gefässpflanzenarten ausgewählter Teilgebiete einerseits (Kap. 3 und 4) und die Flora des gesamten Lägerngebietes andererseits (Kap. 5 und z.T. 6) zu erfassen und durch einen Vergleich mit Angaben in älteren Quellen (s. unten) auf allfällige Veränderungen hin zu untersuchen. Im Zentrum steht somit *die Flora geographisch definierter Lokalitäten,* nicht Vegetationsformen und Pflanzengesellschaften; Zielsetzung und Methoden unterscheiden sich somit klar von einer pflanzensoziologischen Untersuchung, wie sie etwa in der Arbeit von Cuny (R. Cuny, 1983) vorliegt und in der vor allem grossflächig vorkommende Gesellschaften kartiert wurden.

Unter «besonders beachtenswerten» Arten verstehe ich solche,

- die heute im Lägerngebiet selten sind oder zerstreut vorkommen (ohne kaum verwilderte Garten- und Nutzpflanzen),
- die von früher angegeben oder belegt sind (ohne sehr häufige/verbreitete),
- deren Häufigkeit/Verbreitung geändert hat (seltener *und* häufiger gewordene),

- die für eine bestimmte Lokalität besonders kennzeichnend und augenfällig sind (in einem weiteren Umkreis nur hier oder hier besonders zahlreich vorhanden),
- die für das Lägerngebiet aus pflanzengeographisch-ökologischen Gründen bemerkenswert sind.

Als Quellen für die floristische Rekonstruktion benützte ich die Publikationen, Herbarien und Exkursionsnotizen folgender Personen:

M. Rikli: 1868–1951, Pflanzengeograph und Konservator an der ETH (P. Bohny, 1951). Seine Lägern-Publikation (M. Rikli, 1907) ist für die vorliegende Arbeit von grundlegender Bedeutung und ich werde im folgenden oft Stellen daraus zitieren. Die Feldarbeiten wurden zwischen 1901–07 (l.c. S. 81) durchgeführt. Rikli hat etwa 550 Arten aufgelistet (wovon ca. 20 taxonomisch problematische bzw. ausgesprochene Garten- und Nutzpflanzen), spricht aber von «ungefähr 850 Arten» für das ganze Lägerngebiet (l.c., S. 65).

J. Weber: 1888–1966, Arzt in Baden. Das in der Kantonsschule Baden aufbewahrte Herbar enthält etwa 613 Arten aus dem Gebiet, worunter etliche Garten- und Nutzpflanzen; einige Belege von Doris Weber, seiner Tochter. Gesammelt wurde zur Hauptsache zwischen dem 16. 4. 1934 und 1961, schwerpunktsmässig etwa zwischen 1934–36. (Kap. 5.31).

A. Zehnder: 1920–1985, Biologielehrer am ehemaligen Lehrerseminar Wettingen; ihm verdanke ich grundlegende fachliche Impulse. Sein in der Kantonsschule Wettingen aufbewahrtes Herbar enthält etwa 268 Arten aus dem Gebiet, wovon ca. 12 Garten- und Nutzpflanzen. Viele Belege aus der Gemeinde Obersiggenthal. Sammelte zwischen dem 1. 8. 1936 und dem 26. 5. 1979, schwerpunktsmässig etwa 1942–46 (Kap. 5.32).

E. und J. Ulbrich: Ernst: 1887–1965, Chemiker, Orchideenkenner; Julie: 1890–1988; ihr und ihrer Nichte, Frau Frieda Birchmeier-Hirt, verdanke ich das Überlassen der Exkursionsnotizen und von Orchideendias. Im folgenden als *eine* Person zitiert. Von 171 Exkursionen ins Lägerngebiet enthalten 113 floristische Angaben über 261 Arten, davon ein paar mit fraglicher Bestimmung. Herbarbelege fehlen. Beobachtungen zwischen dem 9. 3. 1946 und dem 10. 8. 1963, schwerpunktsmässig etwa 1946–56 (Kap. 5.33).

Für die Artenlisten einzelner Lokalitäten wurden zudem verarbeitet:

A. Güller: Eislochgebiet. Feldarbeiten 1966–68 (A. Güller, 1968). Vgl. Kap. 3.44.

F. Klötzli: Boppelser Weid. Feldarbeiten 1960–66 (F. Klötzli, 1969). Vgl. Kap. 3.23.

In bezug auf das ganze Gebiet (Gesamt-Artenliste) wurden ausserdem noch berücksichtigt:

R. Cuny: Vegetationskundliche Arbeit. Feldarbeiten 1975 (R. Cuny, 1983). Vgl. Kap. 5.34.

M. Welten und R. Sutter: Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen der Schweiz (M. Welten, R. Sutter, 1982). Feldarbeiten zwischen 1966/67 und Ende 1979. Lägern = Kartierfläche 402, aufgenommen von E. Landolt und Mitarbeiter. Vgl. Kap. 5.35.

Dies sind die Hauptquellen. Die Angaben in Kölliker (A. Kölliker, 1839; 91 Arten ausdrücklich vom weitgefassten Lägerngebiet), Mühlberg (F. Mühlberg, 1880; 203 Arten ausdrücklich vom Lägerngebiet, davon 4 Bastarde) und Lüscher (H. Lüscher, 1918; er bezieht sich bereits, *aber nur teilweise*, auf Rikli, Kölliker und Mühlberg) werden bei lokal verschwundenen oder neuen Arten im Kap. 3, dann, wenn die Fundortsangaben einigermassen genau sind, im Kap. 4, insbesondere aber im Kap. 5, *in ergänzendem Sinne* mitberücksichtigt. Dies bedeutet, dass von Kölliker 8, von Mühlberg 67 Arten, die nur bei diesen beiden Autoren angegeben werden und die mir in verschiedener Hinsicht problematisch erscheinen, für die Gesamt-Artenliste nicht berücksichtigt wurden.

Das untersuchte, im folgenden als Lägerngebiet bezeichnete Gebiet ist etwas weiter gefasst als im Welten-Sutter-Atlas, wodurch die Angaben über verschwunne Arten (Kap. 5.1) mehr Gewicht erhalten. Namentlich folgende Teilgebiete be ich für die Beurteilung des generellen Vorkommens oder Fehlens von Arten

(Gesamt-Artenliste) miteinbezogen: Tobel, Böndler, Nuechtal, Häfelerhau, Hertenstein (Gemeinde Obersiggenthal), Martinsberg, Österliwald, Hundsbuck, Teufelskeller bis Kreuzlibergkuppe (Baden), Limmat mit beiden Ufern (Baden, Neuenhof, Wettingen), Schwenkelberg, Bösbuck (Dielsdorf, Buchs, Adlikon), Bönler (Steinmaur), Spaltenfluh (Niederweningen), Chüeboden (Schneisingen), Geissberg, Kalberweid und Haselbuck (Ennetbaden und Oberehrendingen), Gebiet der Dättwiler Weiher (Baden-Dättwil).

Für das Bestimmen der Pflanzen habe ich zur Hauptsache die 17. und 18. Auflage der Binz'schen «Schul- und Exkursionsflora für die Schweiz» (A. Binz, A. Becherer, Ch. Heitz 1980, 1986) samt «Taschenatlas» (E. Thommen, 1951) und die dreibändige «Flora der Schweiz» samt «Bestimmungsschlüssel» (H.E. Hess, E. Landolt, R. Hirzel, 1967, 70, 72, 76) verwendet (dazu weitere: vgl. Literaturverzeichnis). In bezug auf die Nomenklatur habe ich mich soweit wie möglich an die 17., also vorletzte Auflage der Binz'schen Flora gehalten, mit konsequenter Kleinschreibung der Artbezeichnungen. Ich habe mich zu dieser Lösung entschieden, weil in der Nomenklatur weder eine deutliche Beruhigung noch ein durchgreifender Konsens bei den schweizerischen Floren in Sicht ist. Auf die Angabe von Synonymen und Autornamen kann somit weitgehend verzichtet werden. Sowohl die Auswahl der Arten (z. B. bei Garten- und Nutzpflanzen: ausgesetzt? vorübergehend oder dauerhaft verwildert?) als auch insbesondere die Fassung des Artbegriffs (Art, Unterart, Kleinart?) und die damit verbundenen Synonymiefragen sind komplexe Probleme, auf die hier nur kurz hingewiesen sei. Die vielen Namensänderungen, die bei Neuauflagen von Floren meistens zu verzeichnen sind, bedeuten mehr als nur eine Erschwerung der Arbeit: sie lassen die Vergleichbarkeit mit älteren Angaben oft problematisch werden. Dazu ein Beispiel: Die beiden Arten *Utricularia vulgaris* L. und *U. australis* R.Br. (= *U. neglecta* Lehm.) werden in der 2. Auflage der Schinz'schen Flora, auf die sich Rikli bezieht, noch in *einer* Art, *U. vulgaris* L., mit den beiden Varietäten *var. typica* Meister und *var. neglecta* Lehmann, zusammengefasst; man muss wohl annehmen, dass es sich bei Riklis *U. vulgaris* nicht um die heutige *U. vulgaris*, sondern um *U. neglecta* handelt.

Von solchen Entscheidungen hängt nicht zuletzt auch die Artenzahl ab, die in den hier benützten Quellen angegeben wird. *Die gesamte Artenzahl des Lägerngebietes beträgt – im oben defnierten Sinne – etwas mehr als 1000, mit über 1300 Synonymen.* Durch eigene Beobachtungen kann ich das heutige Vorkommen von etwa *780 Arten* bestätigen (12. 6. 91), einschliesslich der 13 von mir angepflanzten Wasserpflanzenarten (vgl. Kap. 3.1).

2.1 Einige Angaben noch zu kritischen Gruppen:

Alle Wasserstern-Funde und -Angaben habe ich unter *Callitriche spec.* zusammengefasst (Rikli nennt *C. hamulata*). Bei Wasserlinsen habe ich wirklich gibbose Formen nicht finden können, und es ist mit Prof. Landolt anzunehmen, dass es sich im Gebiet – vielleicht von temporären Ausnahmen auf dem Limmatstausee abgesehen – wohl stets um *Lemna minor* handelt (vgl. F. Egloff, 1977). Unter *Nymphaea alba* werden wohl auch Bastarde (x), die im vegetativen Zustand schwer erkennbar sind, erfasst worden sein und unter *Rubus fruticosus s.l.* verstehe ich, entsprechend den Angaben im Binz, die Linné'sche Sammelart.

Die folgenden, zumeist Klein- und Unterarten betreffenden Angaben sind provisorisch und bedürfen einer speziellen Abklärung: Bei *Aconitum lycoctonum s.l.* handelt es sich wohl immer um *A. vulparia s.str.*, bei *Alchemilla vulgaris s.l.* um *A. vulgaris ssp. xanthochlora*, bei *Anthyllis vulneraria s.l.* um *A. vulneraria ssp. vulneraria*, bei *Carex muricata s.l.* (= *C. contigua s.l.*) um *C. spicata*, und wohl auch um *C. pairae* (= *C. pairaei*), mit Übergangsformen, bei *Crepis vesicaria ssp. taraxacifolia* um *C. taraxacifolia*, bei *Eleocharis palustris s.l.* um *E. palustris ssp. uniglumis*, bei *Helianthemum nummularium s.l.* um *H. nummularium ssp. ovatum*, bei *Heracleum sphondylium s.l.* meist um *H. sphondylium ssp. australe*, evtl. teilweise um *ssp. montanum*, bei *Lilium bulbiferum ssp. croceum* um *L. croceum*, bei *Molinia coerulea s.l.* um *M. coerulea* (= *M. caerulea*) und *M. litoralis* (= *M. arundinacea*), bei *Primula veris s.l.* um *P. veris ssp. suaveolens* (= *P. columnae*), bei *Pulmonaria officinalis s.l.* um *P. officinalis ssp. obscura*, bei *Sedum telephium s.l.* um *S. telephium ssp. purpurascens*, bei *Thymus serpyllum s.l.* um *Th. serpyllum ssp. pulegioides* (Rikli nennt *Th. serpyllum ssp. polytrichus var. carniolicus*), bei *Tragopogon pratensis s.l.* um *T. pratensis ssp. orientalis* (im Bernaugebiet um *ssp. minor*), bei *Vicia cracca s.l.* um *V. cracca ssp. tenuifolia (= V. tenuifolia)* und *V. cracca ssp. gerardii (= V. incana)*, evtl. noch um *V. cracca ssp. vulgaris*, eine scharfe Trennung ist kaum möglich, und bei *Viola tricolor s.l.* um *V. tricolor ssp. arvensis*.

Die im Gebiet zu findenden Populationen von *Adenostyles cf alliariae*, *Digitalis cf lutea* (vgl. Kap. 3.51), *Phleum cf alpinum*, sowie *Quercus pubescens*, *Rosa pendulina* und *R. spinosissima* (Rikli erwähnt Bastarde vom Grat, Nähe Kantonsgrenze) und die *Sorbus*-Arten müssten namentlich im Hinblick auf mögliche Bastardierungen genauer untersucht werden. Dies gilt auch für *Aquilegia vulgaris* und *A. atrata*, deren Verbreitungsgebiete sich im Lägerngebiet überlappen.

3 Die Flora ausgewählter Teilgebiete

Der Auswahl habe ich zur Hauptsache *zwei* Kriterien zugrundegelegt: Fundstellen mit einigermassen umfangreichen oder interessante Arten betreffenden Listen von *früher* zum einen, floristisch bedeutende und für das Lägerngebiet charakteristische Landschaftsteile zum andern. Die vorgenommene Art der Einteilung (Unterkapitel) tangiert dabei teilweise den Standortsbegriff, namentlich bei Wasserpflanzen, Orchideen, Bäumen und Sträuchern.

Den Artenlisten folgt jeweils ein Kommentar, in dem zu einigen Arten zusätzliche Angaben gemacht werden. Die in der FE-Kolonne (= heutige Situation) angegebenen Kleinbuchstaben bedeuten:

v = verschwunden, verschollen; die Art ist *aus der betreffenden Lokalität* mit grosser Wahrscheinlichkeit verschwunden (vgl. auch Kap. 5.1);

n = neu; die Art wird von mir oder in den benützten nicht publizierten Quellen (Weber, Zehnder, Ulbrich, s. oben) erstmals *für diese Lokalität* angegeben und dürfte mit einiger Wahrscheinlichkeit nicht nur bislang übersehen oder übergangen worden sein (vgl. auch Kap. 5.2);

ü = übersehen oder übergangen; die Art ist wahrscheinlich schon früher an dieser Lokalität vorgekommen, wurde aber übersehen (z. B. *Carex*-Arten) oder mangels Attraktivität oder wegen grosser Häufigkeit übergangen (z. B. *Phragmites australis*, *Leontodon hispidus* u. ä.);

eine Leerstelle schliesslich besagt, dass die Art bei intensivem Suchen möglicherweise noch entdeckt werden könnte.

Weitere oft verwendete Abkürzungen:

FO = Fundort(e), x = Bastarde, Cu = Cuny, WS = Welten-Sutter-Verbreitungsatlas, Kö = Kölliker, Mü = Mühlberg, Lü = Lüscher (vgl. Kap. 2).

3.1 Gewässer

Riklis Angaben über Wasserpflanzen beziehen sich ausschliesslich auf das Furttal, das damals noch «inselartige Überbleibsel» einer einst reichhaltigen Sumpf- und Riedflora, eine «üppige sub- und emerse Wasserflora» und sogar «einige dürftige Anflüge der Hochmoorflora» (l.c. S. 7, 8, 12) aufwies, mit folgenden Arten: *Hydrocotyle vulgaris, Salix repens, Utricularia australis* und *Utricularia minor.* Es waren dies «floristisch die Glanzstellen des Furttales, doch wenn die Urbarmachung des Talbodens in ähnlicher Weise fortschreitet wie in den letzten vierzig Jahren, so wird schon die kommende Generation diese Arten vergebens suchen» (l.c. S. 12). Tatsächlich ist das ausgedehnte Ried, welches sich von Otelfingen/Hüttikon bis gegen Adlikon hinzog, verschwunden (J. Wild, 1852–68, 1990, Blatt XIII, Regensberg).

Die folgende Liste umfasst die höheren Wasserpflanzenarten des gesamten Lägerngebietes, wobei die unterstrichenen Namen Wasserpflanzen im *engeren,* die übrigen im *weiteren* Sinne darstellen (F. Egloff, 1977, S. 7). Sumpf- und Moorpflanzen finden sich auch noch an anderen Stellen, z. B. in der Boppelser Weid (Kap. 3.23). In der vorliegenden Arbeit sind im Gegensatz zur zitierten auch die Pteridophyten mitberücksichtigt.

1. Heute fehlende Arten (v):

Es sind solche der Sümpfe, Moore, Torfgräben *(Hydrocotyle vulgaris, Utricularia minor)* und der sauberen, kalten Gewässer *(Potamogeton densus),* also von Standorten, die im Gebiet stark dezimiert wurden oder verschwunden sind; im weiteren solche, die aus mir unbekannten Gründen verschollen sind (z. B. *Ranunculus circinatus*).

Von den folgenden Arten wäre es denkbar, dass vereinzelte Exemplare im Stausee der Limmat, vom «Wasserpflanzenreservoir Zürichsee» gespiesen, gelegentlich gefunden werden könnten: *Potamogeton crispus, P. lucens, P. pectinatus* und *P. friesii* (von letzterer: Herbarangabe in WS).

2. In relativem Sinne neue Arten [(1), n, ü]:

Von den Arten, die hier erstmals für das Lägerngebiet angegeben werden, fallen die 13 in meinem Gartenweiher (Koord. 667 050/258 000) angepflanzten für den historischen Aspekt ausser Betracht (eingeklammerte 1); ich habe sie aufgeführt, weil es scheint, dass sie sich halten können und weil es später einmal interessant sein wird, festzustellen, ob einzelne von ihnen sich im Gebiet verbreiten konnten.

Als wirklich neu im Gebiet können 2 Arten angesehen werden (n): *Ceratophyllum submersum* (im Weiher bei Sünikon seit nunmehr 20 Jahren vorhanden und neu im Häfelerhau-Folienweiher, wohl immer noch in Ausbreitung begriffen) und *Ranunculus sceleratus* (im Steinbuckweiher, s. unten; im Kanton Zürich heute nur noch an wenigen Stellen [F. Egloff, 1977]).

Mü gibt an: *Hippuris vulgaris* (Höhtal bei Baden), *Lemna trisulca* und *Typha angustifolia* (beide Stadtteich Baden); WS: *Nuphar lutea.*

Potamogeton coloratus erscheint nicht unter den ausgestorbenen Arten, weil sie in meinem Gartenweiher schlecht und recht gedeiht, doch ist es sehr fraglich, ob sie sich wird halten können. Zu achten ist auf *Equisetum fluviatile*, die im engeren

Tabelle 1 Die 69 Wasserpflanzenarten des Lägerngebietes. Die 30 unterstrichenen Artnamen stellen Wasserpflanzen im engeren Sinne dar. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1 = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben. (1) bedeutet bei W: nur in Webers Arbeit erwähnt (J. Weber, 1940/41), nicht in seinem Herbarium enthalten, bei FE: 13 von mir im eigenen Weiher angepflanzte Arten, die sich jedenfalls bis 1991 halten konnten.

Table 1 The 69 water plants of the whole Lägern region. The 30 underlined names of species are water plants in a restricted sense. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1 = recorded only by the respective author. (1) means under W: recorded only in his publication (J. Weber, 1940/41), not present in his herbarium, under FE: 13 species, plant in my own pond and surviving until 1991, however.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Acorus calamus					1ü	*Nuphar lutea*					1
Alisma plantago-aquatica	1				1	*Nymphaea alba (+ evtl. X)*	1				1
Bidens connata			1		1	*Nymphoides orbiculata*					(1)
Bidens tripartita	1	1			v	*Phalaris arundinacea*	1	1	1		1
Butomus umbellatus		1			1	*Phragmites australis*	1	1			1
Callitriche spec.	1				1	*Polygonum amphibium*		1			1
Cardamine amara					1ü	*Potamogeton coloratus*	1				(1)
Carex acutiformis	1	1	1		1	*Potamogeton crispus*		1			v
Carex elata	1	1			1	*Potamogeton densus*	1	1			v
Carex gracilis					1ü	*Potamogeton lucens*		1			v
Carex paniculata	1	1			1	*Potamogeton natans*		1			1
Carex riparia					1ü	*Potamogeton pectinatus*	1	1			v
Carex rostrata	1				v	*Potamogeton pusillus*		1			1
Carex vesicaria	1	1			v	*Ranunculus circinatus*	1	(1)			v
Ceratophyllum demersum					(1)	*Ranunculus fluitans*		1			1
Ceratophyllum submersum					1n	*Ranunculus lingua*	1				1
Eleocharis palustris s.l.	1	1			1	*Ranunculus sceleratus*					1n
Elodea canadensis		1			1	*Ranunculus trichophyllus*		1			1
Elodea nuttallii					(1)	*Rorippa amphibia*					1ü
Equisetum fluviatile	1	1			1	*Sagittaria latifolia*					1
Glyceria fluitans		1			1	*Sagittaria sagittifolia*					(1)
Glyceria maxima			1		1	*Schoenoplectus lacuster*	1	1			1
Glyceria plicata	1	1	1		1	*Sium erectum*	1	1			1
Hippuris vulgaris		(1)			1	*Solanum dulcamara*		(1)		1	1
Hydrocharis morsus-ranae					(1)	*Sparganium minimum*					(1)
Hydrocotyle vulgaris	1				v	*Sparganium ramosum*	1	1		1	1
Iris pseudacorus	1	1			1	*Spirodela polyrrhiza*					1ü
Lagarosiphon major					(1)	*Stratiotes aloides*					(1)
Lemna minor		1			1	*Typha angustifolia*					1
Lemna trisulca					(1)	*Typha latifolia*	1	1			1
Lysimachia thyrsiflora					(1)	*Utricularia australis*	1				(1)
Menyanthes trifoliata	1		1	1	1	*Utricularia minor*	1				v
Myriophyllum spicatum		1			1	*Veronica anagallis-*					
Myriophyllum verticillatum		1			1	*aquatica*	1	1	1		(1)
Nasturtium officinale	1	1			1	*Veronica beccabunga*		1		1	1

Lägerngebiet nur noch in einer einzigen Population vorkommt (s. unten). Im Weber-Herbarium befindet sich ein Beleg unter dem Namen *Potamogeton nodosus* (ohne Fundjahr), doch handelt es sich dabei um die Fliesswasserform von *P. natans*. Es ist möglich, dass auch die Angabe in WS in diesem Sinne irrtümlich ist. In Webers Herbar befindet sich ein Brief von A. Binz, datierend vom 9. 9. 41, in welchem die Angabe in Webers Arbeit (J. Weber, 1940/41) über *Potamogeton trichoides* im Stausee Wettingen als irrig festgestellt und zu *P. pusillus ssp. panormitanus* korrigiert wird.

Es folgt eine Zusammenstellung wichtiger Gewässer des Lägerngebietes mit ihrer rezenten, aquatischen Flora und bemerkenswerten Arten der direkten Umgebung. Dabei sind auch künstlich angelegte Weiher erfasst. Die Listen sind in bezug auf Wasserpflanzen im engeren Sinne (unterstrichene Namen) vollständig. Bei kleineren Gewässern sind die Koordinaten angegeben.

1. Limmat-Stausee bei Wettingen und Neuenhof bis Würenloser Bucht:

Anemone ranunculoides, *Bidens connata* (nur hier und bereits von A. Zehnder vom 16. 9. 61 belegt), *Cardamine amara*, *Carex paniculata*, *C. pilosa*, *Corydalis cava*, *Glyceria maxima* (nur hier!), *Humulus lupulus*, *Iris pseudacorus*, *Lycopus europaeus*, *Mentha aquatica*, *Myriophyllum spicatum*, *Ranunculus fluitans* (nur hier!), *Rorippa amphibia* (nur hier!), *Scrophularia nodosa*, *Sium erectum* (wild nur hier!), *Solanum dulcamara*, *Solidago gigantea var. serotina*, *Sparganium ramosum*, *Stachys palustris* (nur hier!), *Typha latifolia*, *Valeriana officinalis*, *Veronica beccabunga*.

2. Bussbergweiher (667 500/258 540, beim Brunnen):

Callitriche spec., *Cardamine amara*, *Elodea canadensis*, *Juncus articulatus*.

3. Muntelweiher (669 460/258 550, oberhalb Muntel-Hütte):

Carex acutiformis, *Carex elata*, *Carex pendula*, *Glyceria fluitans*, *Glyceria plicata*, *Hippuris vulgaris*, *Iris pseudacorus*, *Iris sibirica*, *Juncus effusus*, *Juncus inflexus*, *Juncus subnodulosus*, *Lemna minor*, *Lycopus europaeus*, *Lythrum salicaria*, *Mentha aquatica*, *Myriophyllum verticillatum*, *Nasturtium officinale*, *Sagittaria latifolia* (nur hier!), *Scirpus silvaticus*, *Sparganium ramosum*, *Typha latifolia*, *Veronica beccabunga*.

4. Eigiweiher (670 000/258 405, an Strasse, mit Picknickplatz):

Callitriche spec., *Iris pseudacorus*, *Lemna minor*, *Lycopus europaeus*, *Typha latifolia*.

5. Unterer Gchüttweiher (669 200/256 900, am Bach):

Alisma plantago-aquatica (nur hier!), *Hypericum tetrapterum*, *Lemna minor*, *Melandrium diurnum*, *Nymphaea alba* (evtl. x), *Potamogeton natans*, *Ranunculus trichophyllus*, *Scirpus silvaticus*, *Sparganium ramosum*, *Stellaria aquatica*, *Typha latifolia*.

6. Gchüttweiher Bollen (669 200/257 190, Waldrand bei Pfadihütte):

Buddleja davidii, *Lemna minor*, *Scutellaria galericulata*, *Typha latifolia*.

7. Merzenacherweiher (669 860/257 360, mehrere kleine Gewässer am Westrand der Merzenächer, Naturschutzgebiet):

Elodea canadensis, *Galium palustre*, *Lysimachia vulgaris*, *Mentha aquatica*, *Menyanthes trifoliata*, *Pinguicula vulgaris*: noch 1959/60 vorhanden, heute fehlend, *Potentilla erecta*, *Silaum silaus*, *Solidago virgaurea*, *Valeriana dioeca*.

8. Isenbüelweiher (671 400/258 110, nördlich Otelfingen, droht zu verlanden):

Carex riparia (Bachufer), *Equisetum fluviatile* (im engeren Lägerngebiet nur hier!).

9. Boppelserweiher (672 760/258 470, gut unterhalten):

Elodea canadensis, *Humulus lupulus*, *Hypericum tetrapterum*, *Mentha aquatica*, *Mentha longifolia* (nur hier!), *Potamogeton pusillus* (auch im Ausflussbach), *Salix purpurea*.

10. Grimmrütiweiher (673 180/258 870, 3 benachbarte Weiher):

Carex gracilis (nur hier!), *Mentha aquatica*, *Nuphar lutea*, *Phragmites australis*, *Salix nigricans*.

11. Westliches Riese-Weiherchen (674 020/258 200):
Lemna minor, Menyanthes trifoliata, Potamogeton pusillus.

12. Oberstes Riese-Weiherchen (674 060/258 300, an Strasse):
Geum rivale.

13. Östliches Riese-Weiherchen (674 080/258 200, mit Steilbord):
Aquilegia vulgaris (s.l.), Hypericum tetrapterum, Iris pseudacorus, Petasites albus.

14. Weiher alte Bahn Buchs (675 250/257 050, nicht in Karte):
Epilobium parviflorum, Nasturtium officinale, Prunus laurocerasus, Rosa canina, Salix purpurea, Typha latifolia.

15. Furtbach mit Zuflüssen:
Nasturtium officinale, Potamogeton natans (Fliesswasserform), *Ranunculus trichophyllus.*

16. Oberer Hirsmüliweiher (675 800/259 440; südöstlich Regensberg):
Iris pseudacorus, Typha latifolia.

17. Mittlerer Hirsmüliweiher (675 950/259 500; südöstlich Regensberg):
Alnus glutinosa, Lemna minor, Veronica beccabunga.

18. Unterer Hirsmüliweiher (676 300/259 550, langer Entenweiher):
Carex elata, Filipendula ulmaria, Iris pseudacorus, Lemna minor, Polygonum cuspidatum, Typha latifolia.

19. Weiher bei Sünikon (675 500/260 550):
Ceratophyllum submersum (hier seit 20 Jahren!), *Iris pseudacorus.*

20. Steinbuckweiher (669 010/260 080, südlich Steinbuck):
Ranunculus sceleratus (nur hier!), *Typha latifolia.*

21. Häfelerhau-Folienweiher (665 100/260 080, 2 künstliche Weiher):
Ceratophyllum submersum, Lemna minor, Nymphaea alba (evtl. x), *Potentilla recta, Ranunculus lingua, Schoenoplectus lacuster.*

22. Böndlerweiher (664 490/261 050; nordwestlich Nuechtal):
Acorus calamus (wild nur hier!), *Alnus incana, Aquilegia vulgaris, Carex elata, Epilobium parviflorum, Equisetum palustre, Iris pseudacorus, Lemna minor, Mentha aquatica, Myriophyllum verticillatum, Nasturtium officinale, Potamogeton natans, Ranunculus lingua, Solanum dulcamara, Spirodela polyrrhiza, Typha latifolia, Typha angustifolia.*

23. Dättwiler Weiher (mehrere Kleingewässer einschliesslich grosser Stadtweiher, wovon dieser und der Waldrandweiher bei 663 920/257 200 für Wasserpflanzen besonders wichtig sind; alle ausserhalb des engeren Lägerngebietes):
Alnus glutinosa, Carex pendula, Eleocharis palustris s.l. (Waldrandweiher), *Equisetum fluviatile* (Waldrandweiher), *Glyceria fluitans, Iris pseudacorus, Lemna minor, Lysimachia vulgaris* (Waldrandweiher), *Nymphaea alba* (wohl angepflanzt), *Petasites hybridus* (am grossen, nur hier!), *Polygonum amphibium* (im grossen, nur hier!), *Ranunculus lingua, Schoenoplectus lacuster, Scirpus silvaticus, Spirodela polyrrhiza* (Waldrandweiher), *Typha latifolia.*

3.2 Offene Landschaft

In diesem Kapitel soll die Flora der bemerkenswertesten Mager- und Trockenwie- (Riklis «Magermatten» und «Burstwiesen»), aber auch der Ried-, Sumpf- und :inzelter Fettwiesen (Riklis «Mähwiesen») des Lägerngebiets, einschliesslich angrenzenden Waldränder, dargestellt werden.

Tabelle 2 Bemerkenswerte Arten des Greppengebietes, einschliesslich der benachbarten Waldrandzonen (ohne Kellen- und Pfeiferholz). R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1̲ = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben.

Table 2 Noteworthy species from the area of Greppe, including the adjoining edges of the forest (without Kellen- and Pfeiferholz). R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1̲ = recorded only from the respective author.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Agrimonia eupatoria	1				1	*Hypericum humifusum*				1	1
Amelanchier ovalis				1̲		*Hypericum pulchrum*		1			v
Anacamptis pyramidalis	1			1	v	*Hypericum tetrapterum*					1̲ü
Anagallis arvensis				1	1	*Juniperus communis*	1̲				v
Anthericum ramosum	1			1	v	*Knautia arvensis*					1̲ü
Anthyllis vulneraria s.l.	1̲					*Koeleria cristata*	1̲				v
Aquilegia vulgaris					1̲ü	*Lathyrus montanus*					1̲ü
Aster amellus	1̲				v	*Legousia speculum-veneris*				1̲	v
Bellidiastrum michelii	1̲				v	*Lilium martagon*					1̲n
Campanula glomerata	1				1	*Linum catharticum*	1̲				
Campanula patula				1̲	v	*Listera ovata*	1			1	1
Carex montana	1				1	*Maianthemum bifolium*					1̲n
Carex ornithopoda					1̲ü	*Monotropa hypopitys*					1̲ü
Carex pallescens					1̲ü	*Neottia nidus-avis*	1				1
Carlina vulgaris	1̲					*Onobrychis viciifolia*	1̲				
Centaurea jacea					1̲ü	*Ononis repens*	1				1
Cephalanthera damasonium	1			1		*Ophrys fuciflora*	1̲				v
Cephalanthera longifolia	1̲				v	*Ophrys insectifera*	1̲				v
Cephalanthera rubra				1̲		*Ophrys sphecodes*	1̲				v
Chrysanthemum leucanthemum	1				1	*Orchis incarnata*				1̲	v
						Orchis latifolia	1̲				v
Cirsium palustre					1̲ü	*Orchis maculata*	1			1	v
Convallaria majalis				1	1	*Orchis mascula*	1	1		1	1
Crepis paludosa					1̲ü	*Orchis militaris*	1̲				v
Crepis praemorsa	1̲					*Orchis morio*	1			1	v
Cypripedium calceolus	1			1	v	*Orchis purpurea*	1		1	1	1
Cytisus sagittalis				1̲	v	*Orchis traunsteineri*	1̲				v
Dryopteris robertiana					1̲ü	*Pastinaca sativa*					1̲ü
Epipactis palustris					1̲ü	*Peucedanum cervaria*	1̲				v
Epipactis purpurata					1̲n	*Picris hieracioides*					1̲ü
Euphorbia verrucosa	1				1	*Pimpinella major*					1̲ü
Euphrasia rostkoviana					1̲ü	*Pimpinella saxifraga*	1̲				v
Festuca ovina	1̲				v	*Platanthera bifolia*	1			1	v
Galium verum	1				1	*Platanthera chlorantha*	1			1	v
Genista germanica				1̲	v	*Polygala amarella*	1	1			
Genista tinctoria				1̲	v	*Polygala vulgaris*	1	1			1
Genitiana cruciata	1̲				v	*Potentilla erecta*	1̲				v
Gymnadenia conopea				1	1	*Prunella grandiflora*	1̲				v
Gymnadenia odoratissima				1̲	v	*Pyrola minor*				1̲	v
Hepatica nobilis					1̲n	*Pyrola rotundifolia*				1̲	v
Herminium monorchis	1̲				v	*Pyrus nivalis*	1̲				v

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Ranunculus bulbosus					1ü	*Sorbus torminalis (+ evtl.*					
Ranunculus lanuginosus					1ü	*Bastarde)*	1	1			
Ranunculus nemorosus	1		1			*Stachys officinalis*					1ü
Rosa canina					1ü	*Stachys recta*					1ü
Salvia pratensis					1ü	*Tamus communis*		1			1
Sanguisorba minor	1					*Teucrium scorodonia*					1ü
Silaum silaus		1			1	*Thesium rostratum*	1	1			v
Silene cucubalus				1		*Tragopogon pratensis s.l.*					1ü
Solidago vigaurea					1ü	*Trifolium campestre*				1	v
Sorbus aria (+ evtl.						*Trifolium montanum*	1				v
Bastarde)	1				1	*Valeriana dioeca*			1		
Sorbus mougeotii (+ evtl.						*Valeriana officinalis*					1ü
Bastarde)	1				1	*Viola tricolor s.l.*					1ü

3.21 Das Greppengebiet (± 669 5/257 5)

Ich beginne mit derjenigen Lokalität, die Rikli mit Begeisterung als «Glanzpunkt» der «äusserst blumenreiche(n) Magermatten» bezeichnet (l.c. S. 19) und die im Laufe der vergangenen Jahrzehnte eine markante, durch die vorhandene Dokumentierung recht gut rekonstruierbare floristische Veränderung – vor allem Verarmung – durchgemacht hat. Der interessante Flurname könnte gemäss Schweizerischem Idiotikon (F. Staub et al., 1885, Spalte 698) auf «Gräbt» oder «Grepp» zurückgehen und auf einen alten Begräbnisplatz hinweisen.

Viele Angaben – nicht nur bei Rikli – beziehen sich speziell auf die Merzenäcker, die damals besonders artenreich gewesen sein müssen.

1. Verschwundene Arten (v):

Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind mindestens 37 Arten aus dem Greppengebiet verschwunden, wobei der Rückgang der Orchideen besonders augenfällig ist (s. unten).

Für viele Arten dürften die veränderten intensivierten Bewirtschaftungsmethoden den Hauptgrund für ihr Verschwinden aus diesem Gebiet darstellen. Auch die noch vorhandenen Magerkeitszeiger (z. B. *Campanula glomerata*) bilden zumeist nur noch rudimentäre Populationen in Randzonen der Felder. *Genista germanica* und *G. tinctoria* kommen nur noch im entfernt benachbarten Pfeiferholz vor (vgl. Kap. 3.43 und 4). Alle 3 Ginsterarten sind aus dem Greppengebiet verschwunden. Zu *Pyrus nivalis* vgl. Kap. 3.51. Auch *Thesium rostratum*, welche bereits von Mühlberg von der «Greppenfluh» angegeben wird und nach Rikli «sehr reichlich um den Gipfelkegel der Greppe» vorgekommen ist (und die nach ihm eine «...östliche Art, welche an der Greppe, am Uetliberg und bei Chur ihre letzten verspreng- westlichen Vorposten stehen hat», darstellt, l.c. S. 21 und 26), wird heute geblich gesucht. Interessant ist, dass in Webers Herbar ein Beleg dieser Art vom .36 mit dem Vermerk «selten» zu finden ist.

2. Neue Arten (n)

Epipactis purpurata und *Majanthemum bifolium* am Weg über den Greppenbuck, *Hepatica nobilis* und *Lilium martagon* wohl angepflanzt bei der Hütte am nordöstlichen Waldrand.

3. Übersehene oder übergangene Arten (ü)

Diese 27 Arten dürften bereits früher vorgekommen sein. *Carex ornithopoda:* bedeutende Population südlich und südwestlich des Greppenbucks, *Dryopteris robertiana* bei der Sintersteinstelle: 669 740/257 340.

3.211 Die Orchideen des Greppen- und des gesamten Lägerngebietes

«Ausserordentlich reich ist der Orchideenflor, und zwar sowohl nach der Arten- als auch nach der Individuenzahl. Von den 49 schweizerischen Orchideen fehlen fast nur die spezifisch insubrischen (5) und alpinen (10) Arten. Zählt doch die Artenliste der Orchideen der Lägern 34 Species; die Hauptmenge derselben sind Begleiter der Burstwiesen.» (M. Rikli, l.c. S. 19). Riklis Zählweise ist allerdings etwas unklar; er führt nur 31 Arten namentlich auf, und von zwei Arten *(Coeloglossum viride, Goodyera repens)* steht nicht fest, ob er sie selber noch gefunden hat. *Aceras anthropophorum* und *Liparis loeselii* konnte er nicht mehr auffinden.

Hier sind die Angaben der Orchideenkenner E. und J. Ulbrich, deren Exkursionsnotizen eine reichhaltige Orchideenflora des Greppengebiets noch bis 1947 (teilweise bis 1962) belegen, interessant.

Von den 36 Orchideenarten, die aus dem Lägerngebiet überhaupt belegt sind, werden immerhin 25 Arten aus dem Greppengebiet angegeben; von diesem Artenreichtum sind heute nur noch 5 (vielleicht 6: ü, dazu 1 neue: n) Arten übriggeblieben. Dies hat Rikli kommen sehen: «Leider werden dieselben (gemeint sind magere Bergwiesen) durch Bestreuen mit Natur- oder Kunstdünger auch mehr und mehr in Kunstwiesen übergeführt, selbst auf den abgelegenen blumenreichen Wiesen der Greppe wurden 1905 einzelne Teile gedüngt ...geeignet, in absehbarer Zeit die prächtigen Orchideenwiesen und den so überaus mannigfaltigen Flor der Burstwiesen zu gefährden.» (l.c. S. 53).

Andererseits ist mein Neufund (n) von *Epipactis purpurata* (= *E. violacea*) interessant: Diese Art, die ich zudem im Pfeiferholz aufgefunden habe, scheint für das Greppengebiet tatsächlich neu zu sein, ist es doch ganz unwahrscheinlich, dass sie von den sachkundigen Sammlern – insbesondere von E. und J. Ulbrich, die das Greppengebiet während vieler Jahre mehrfach besuchten und die Art für die Boppelser Weid angeben – übersehen wurde. *Epipactis purpurata* wird auch im WS nicht für das Lägerngebiet angegeben.

Epipactis palustris, welche ich 1960 oberhalb des Aggenbühls gefunden habe, dürfte als damalige «Trivialart» übergangen worden sein (ü).

Auf Grund der Gegebenheiten: dass die Greppe um die Jahrhundertwende wohl die orchideenreichste Lokalität darstellte, dass dieser Ort auch nachher oft besucht wurde und dass dieses Gebiet verschiedene Bewirtschaftungsmethoden erfahren hat, kann der Versuch gemacht werden, eine «Aussterbe-Reihenfolge» herauszuarbeiten und *Bedrohtheitsklassen* für einige Orchideenarten zu erstellen.

Tabelle 3 Die 36 Orchideenarten des gesamten Lägerngebietes und der Greppe im besonderen. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. Eine 1 bedeutet einen Fund aus dem Greppengebiet, dem um die Jahrhundertwende offenbar artenreichsten Trockenwiesengebiet; diese Greppen-Arten sind zudem unterstrichen. (1) = Fundangaben vom Lägerngebiet, aber nicht von der Greppe; [1] = von Rikli nicht (oder nicht sicher) selber gefunden; 0 = vom betreffenden Sammler/Autor aus dem Lägerngebiet nicht belegt/angegeben.

Table 3 The 36 species of orchids from the whole Lägern region, in particular from the area of Greppe. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff. 1 means recorded from the area of Greppe, which was the dry-meadow with the biggest number of species on the turn of the century; these species are underlined, in addition. (1) = records from the Lägern region, but not from the area of Greppe; [1] = not (or not surley) recorded from Rikli; 0 = not recorded from the Lägern region by the concerning author.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Aceras anthropophorum	[1]	0	0	0	0	*Neottia nidus-avis*	1	0	0	(1)	1
Anacamptis pyramidalis	1	(1)	(1)	1	(1)	*Ophrys apifera*	0	0	(1)	(1)	(1)
Cephalanthera damasonium	1	0	0	1	(1)	*Ophrys fuciflora*	1	0	0	0	0
Cephalanthera longifolia	1	0	0	(1)	0	*Ophrys insectifera*	1	(1)	0	(1)	(1)
Cephalanthera rubra	(1)	(1)	0	1	(1)	*Ophrys sphecodes*	1	0	0	0	0
Coeloglossum viride	[1]	0	0	0	0	*Orchis globosa*	0	0	0	(1)	0
Cypripedium calceolus	1	0	0	1	0	*Orchis incarnata*	(1)	(1)	0	1	(1)
Epipactis atropurpurea	0	(1)	0	(1)	(1)	*Orchis latifolia*	1	0	0	(1)	(1)
Epipactis helleborine	(1)	(1)	0	(1)	(1)	*Orchis maculata*	1	(1)	0	1	(1)
Epipactis palustris	(1)	0	(1)	(1)	lü	*Orchis mascula*	1	1	(1)	1	1
Epipactis purpurata	0	(1)	0	(1)	ln	*Orchis militaris*	1	(1)	(1)	(1)	(1)
Goodyera repens	[1]	0	0	(1)	0	*Orchis morio*	1	(1)	(1)	1	(1)
Gymnadenia conopea	(1)	0	0	1	1	*Orchis purpurea*	1	(1)	1	1	1
Gymnadenia odoratissima	(1)	(1)	0	1	(1)	*Orchis traunsteineri*	1	(1)	0	(1)	(1)
Herminium monorchis	1	0	0	(1)	(1)	*Orchis ustulata*	0	0	(1)	(1)	(1)
Himantoglossum hircinum	(1)	(1)	0	0	(1)	*Platanthera bifolia*	1	0	(1)	1	(1)
Liparis loeselii	[1]	0	0	0	(1)	*Platanthera chlorantha*	1	0	0	1	(1)
Listera ovata	1	0	0	1	1	*Spiranthes aestivalis*	(1)	0	(1)	(1)	(1)

Bedrohtheitsklasse 1: Von Rikli, somit um die Jahrhundertwende, bereits nicht mehr oder nicht eindeutig nachgewiesene und, abgesehen von der sehr seltenen Liparis, auch heute nicht mehr vorhandene Arten: *Aceras anthropophorum, Coeloglossum viride, Goodyera repens, Liparis loeselii.*

Bedrohtheitsklasse 2: Von Rikli noch belegte, später aber weder auf der Greppe noch anderswo gefundene Arten: *Ophrys fuciflora, O. sphecodes* (letztere bei Rikli noch «reichlich»!).

Bedrohtheitsklasse 3: Wenigstens noch von anderswo bis heute belegte Arten: *rminium monorchis, Ophrys insectifera, Orchis latifolia, O. militaris, O. traun-*

theitsklasse 4: Noch von Ulbrich (hauptsächlich bis Mitte der 50er Jahre) reppe, von anderen Stellen bis heute nachgewiesene Arten (Ausnahme *calceolus*): *Anacamptis pyramidalis, Cephalanthera damasonium,*

Cypripedium calceolus, Gymnadenia odoratissima, Orchis incarnata, O. maculata, O. morio, Platanthera bifolia, P. chlorantha.

Bedrohtheitsklasse 5: Heute noch im Greppengebiet vorhandene, offenbar weniger empfindliche Arten: *Epipactis palustris, Gymnadenia conopea, Listera ovata, Neottia nidus-avis, Orchis mascula, O. purpurea.* Letztere ist allerdings nur noch an den Wiesenrändern und im benachbarten Wald zu finden und war, nach den Aussagen von W. Bauder, der seit vielen Jahren die Orchideen des Greppengebietes beobachtet, früher viel häufiger. So hätte er etwa um 1978 im Greppengebiet noch über 500 Stück gezählt, 1989 etwa 45 und 1990 – «ein gutes Jahr» – 150 Stück. Die Individuenzahlen scheinen bei dieser Art beträchtlichen jährlichen Schwankungen zu unterliegen.

Und schliesslich kann nicht ausgeschlossen werden, dass *Epipactis purpurata* sogar in Ausbreitung begriffen ist.

3.22 Das Bussberggebiet (667 5/258 5)

Der Bussberg, Mitte des letzten Jahrhunderts noch Buosenberg genannt (R. W. Brüschweiler et al., 1978), stellt eine von Wald umgebene, im oberen, botanisch interessantesten Teil recht steile Wiese dar, welche auf einer abgerutschten Schutt- und Bergsturzmasse der Wettingerschichten liegt (G. Senftleben, 1923). Der Bussberg und die Boppelser Weid (Kap. 3.23) stellen flächenmässig und vom Artenspektrum her gesehen wohl die bedeutendsten «Blumenmatten» dar, die sich in unsere Zeit hinüberretten konnten.

Früher waren besonders die beiden nördlich gelegenen Waldwiesen von grossem floristischem Interesse. Heute sind sie stark beschattet und stehen deutlich hinter dem oberen, namentlich nordöstlichen Teil der grossen Wiese, zurück – die westliche ist in der 25000er Karte nicht einmal mehr eingezeichnet.

1. Verschwundene Arten (v):

Nicht nur aus dem Bussberg-, sondern aus dem ganzen Lägerngebiet sind verschwunden: *Anthericum liliago* (bis 1955, vgl. Kap. 3.51), *Botrychium lunaria* (auf Riklis Karte im unteren Wiesenteil), *Coeloglossum viride* (Rikli zitiert Schröter: Südseite des Bussberges), *Goodyera repens* (Rikli: «Dickern südöstlich Buss-

Bild 2 Der Bussberg ob Wettingen, Blick gegen Nordosten, Richtung «Orchideenecke»

Fig. 2 The Bussberg above Wettingen, looking north-east, to the «orchid corner»

Tabelle 4 Bemerkenswerte Arten des Bussberggebietes einschliesslich Waldrandzonen. R = M. Rikli, W = J. Weber, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. 1 = in diesem Gebiet vorhanden, 1̲ = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben.

Table 4 Noteworthy species from the area of Bussberg. R = M. Rikli, W = J. Weber, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff. 1 = recorded from this area, 1̲ = recorded only from the respective author.

Name in Binz, 17. A.	R	W	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	U	FE
Ajuga genevensis		1		1	*Hieracium pilosella*	1			1
Anacamptis pyramidalis	1		1	1	*Himantoglossum hircinum*	1	1		v
Anthericum liliago			1̲	v	*Hippocrepis comosa*	1			1
Anthericum ramosum				1̲	*Holcus lanatus*	1			1
Anthriscus silvestris				1̲	*Hypericum perforatum*				1̲
Anthyllis vulneraria	1			1	*Knautia arvensis*	1			1
Aquilegia atrata				1̲	*Leontodon hispidus*				1̲
Aquilegia vulgaris	1			1	*Ligustrum vulgare*				1̲
Asperula cynanchica	1̲			v	*Linum catharticum*				1̲
Aster amellus				1̲	*Lotus corniculatus*	1			1
Avena pubescens	1			1	*Luzula campestris*				1̲
Botrychium lunaria	1̲			v	*Melica nutans*		1		1
Briza media	1			1	*Muscari comosum*				1̲ü
Bromus erectus	1			1	*Muscari racemosum*				1̲
Campanula patula				1̲	*Neottia nidus-avis*			1	1
Campanula rotundifolia				1̲	*Onobrychis viciifolia*	1			1
Carex caryophyllea				1̲	*Ononis repens*	1			1
Carex digitata				1̲	*Ophrys insectifera*				1̲ü
Carex flacca	1			1	*Ophrys sphecodes*	1̲			v
Carex montana	1			1	*Orchis mascula*	1		1	1
Carex ornithopoda				1̲	*Orchis morio*			1	1
Carlina acaulis				1̲n	*Orchis purpurea*	1		1	1
Carlina vulgaris				1̲	*Picris hieracioides*				1̲
Centaurea jacea	1			1	*Pimpinella saxifraga*	1			1
Centaurea scabiosa	1			1	*Platanthera bifolia*				1̲ü
Cephalanthera damasonium			1	1	*Platanthera chlorantha*			1	1
Cephalanthera rubra				1̲	*Polygala amarella*	1			1
Chrysanthemum					*Polygala vulgaris*	1			1
leucanthemum	1			1	*Populus tremula*				1̲
Cirsium acaulon				1̲n	*Primula veris s.l.*			1	1
Cirsium vulgare				1̲	*Prunella grandiflora*				1̲
Coeloglossum viride	1̲			v	*Prunella vulgaris*	1			1
Daphne laureola			1	1(n)	*Prunus spinosa*				1̲
Daphne mezereum				1̲	*Pteridium aquilinum*				1̲
Euphorbia cyparissias	1			1	*Pyrola secunda*			1̲	v
Festuca ovina	1̲			v	*Ranunculus bulbosus*	1			1
Fragaria vesca				1̲	*Rosa arvensis*				1̲
Gentiana ciliata				1̲ü	*Salvia pratensis*	1			1
Geranium molle				1̲n	*Sanguisorba minor*				1̲
Goodyera repens	1̲			v	*Satureja vulgaris*				1̲
ymnadenia conopea			1	1	*Scabiosa columbaria*	1			1
lianthemum					*Solanum nigrum*				1̲
mmularium s.l.				1̲	*Solidago vigaurea*				1̲

Name in Binz, 17. A.	R	W	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	U	FE
Sorbus aria				1	*Veronica chamaedrys*				1
Stachys officinalis				1	*Veronica montana*				1
Teucrium chamaedrys	1			v	*Veronica serpyllifolia*				1
Thlaspi perfoliatum				1	*Veronica teucrium*				1
Thymus serpyllum s.l.	1			v	*Vicia cracca s.l.*	1			1
Tragopogon pratensis s.l.				1	*Vinca minor*				1
Trisetum flavescens				1	*Viola mirabilis*				1
Veronica beccabunga				1	*Viola riviniana*				1

berg»), *Ophrys sphecodes, Pyrola secunda* (Ulbrich: «vor dem höher gelegenen Waldwieschen, 21. 2. 48»; Rikli: «in lichten Föhrengehölzen»).

Folgende Arten finden sich noch auf Felsfluren und auf dem Grat: *Asperula cynanchica, Festuca ovina, Teucrium chamaedrys, Thymus serpyllum s.l.,* letztere auch noch an hell beschienenen Wegborden. Haben sich diese lichthungrigen Arten an die sonnigsten Stellen zurückgezogen? (Kap. 6.3).

Von *Himantoglossum hircinum* fand Rikli am 7. Juni 1904 nur noch ein einziges Exemplar. Sie soll in den angrenzenden Kiefernschonungen noch bis in die 70er Jahre häufig gewesen sein. In Webers Herbar ist die Art mit mehreren Exemplaren (!) und mit Photos noch vom 15. 5. 46 von hier belegt. Da in Cuny und in WS die Riemenzunge für das Lägerngebiet nicht angegeben wird, ist mein Neufund im Bernaugebiet interessant (Kap. 3.25).

2. Neue Arten (n):

Cirsium acaulon und *Carlina acaulis:* nur ganz vereinzelt; angepflanzt? *Daphne laureola* wird von Ulbrich bereits aus dem Jahr 1948 von hier angegeben, gegenüber Rikli (Jahrhundertwende) muss die Art aber als neu für das Bussberggebiet angesehen werden. Sie findet sich vereinzelt an den Heckenrändern auf der Bussbergwiese selber, geradezu häufig aber (durchschnittlich etwa 10 Stöcke auf eine Are) im östlich angrenzenden Wald der Dickeren. Interessant ist nun, dass Rikli diese Art nur an 2 benachbarten Stellen auf der Nordseite der Lägern hat finden können (vgl. Kap. 3.41), dass sie damals also sehr selten war. Im weiteren belegt er durch die Angabe von *Goodyera repens* von der Dickeren, dass er hier war (s. oben) – und hier hätte er *Daphne laureola* nicht übersehen können, *wenn* sie damals vorgekommen wäre! Noch an zahlreichen anderen Stellen im Lägerngebiet ist der lorbeerblättrige Seidelbast heute zu finden, und er stellt eine der wenigen Arten dar, von denen man mit Sicherheit sagen kann, dass sie gegenüber früher weiter verbreitet und häufiger geworden sind (vgl. Kap. 5.6). Unsicherer ist die Beurteilung von *Geranium molle:* Sie wurde von Weber und Zehnder an anderen Orten gefunden und kommt noch am Radweg östlich Otelfingen vor, für den Bussberg ist sie neu; sie wird auch in WS nicht für das Lägerngebiet angegeben.

3. Übersehene oder übergangene Arten (ü):

Eigenartig ist, dass *Gentiana ciliata* hier erstmals für diese Lokalität angegeben werden kann; bei Rikli fehlt sie überhaupt, Weber gibt sie von Oberehrendingen und Ulbrich von der Boppelser Weid an. Es ist anzunehmen, dass der gefranste Enzian als damals häufige Art übergangen wurde. Gleiches gilt wohl auch für

Ophrys insectifera und *Platanthera bifolia*. Das Vorkommen von *Muscari comosum* auf dem Bussberg ist unter Wettinger Pflanzenfreunden schon seit Jahrzehnten bekannt. Die wenigen noch existierenden Pflanzen bilden die *einzigen und letzten Exemplare des ganzen Lägerngebietes* und verdienen besondere Beachtung (vgl. Kap. 6.3: Naturschutzkonflikte). Die Art wird nur noch von Weber belegt: Bahndamm NOK, Baden, 24. 5. 1935; insofern neu für das Lägerngebiet.

3.23 Die Boppelser Weid (673 9/258 0)

Riklis «Heerenguter Bergwiesen» und «Hängemoore östlich Boppelsen», die zu seiner Zeit eine «...nicht ganz so reichhaltige Flora wie...[die] Greppe...» aufwiesen (l.c. S. 24), stellen heute mit über 250 Arten die artenreichste Lokalität im Lägerngebiet dar. Auch Cunys Vegetationskarte der Lägern (R. Cuny, 1983) belegt mit mehr als 15 verschiedenen Pflanzengesellschaften die hervorragende Reichhaltigkeit dieser Lokalität, und in Klötzlis Arbeit (F. Klötzli, 1969) werden von hier 120 Arten angegeben. Die Einmaligkeit und der hohe Wert der Boppelser Weid – auch für Schmetterlinge (J. Kohler, 1987) – gründen zur Hauptsache auf zwei Tatsachen: Zum einen stellt sie *für viele Arten die einzige Fundstelle im ganzen Lägerngebiet* dar, zum andern bildet sie eine Art *Refugium* für viele Arten, die um die Jahrhundertwende noch im Furttal vorgekommen sind.

1. Verschwundene Arten (v):

Es sind (U = Ulbrich): *Anacamptis pyramidalis* (U: 31. 5. 34), *Cirsium acaulon* (vgl. Bussberg, Kap. 3.22), *Epipactis atropurpurea* (wurde bis ca. 1980 von W. Bauder beobachtet), *E. purpurata* (U: 10. 8. 63), *Gentiana asclepiadea* (wie *E. atropurpurea*), *G. cruciata* (U: 14. 8. 56), *G. germanica* (Zehnder: 24. 9. 36, Weber noch 14. 9. 41), *G. utriculosa, Ophrys sphecodes* (beide nur Rikli), *Orchis globosa* (U: 30. 5. 46), *Polygala chamaebuxus* (U ohne genaue FO-Angabe; die Art wurde bis vor einigen Jahren von W. Bauder und H. Fenner im westlichen Wäldchen noch gesehen), *Pyrola rotundifolia* (Weber: 31. 5. 34, ohne genaue FO-Angabe), *P. secunda* (U: 4. 7. 48, beim Waldrand Rüti), *Pyrus nivalis* (nur Rikli; nach Lü ist es *P. communis v. pyraster*), *Reseda lutea* (U: 10. 8. 63).

2. Übersehene oder übergangene Arten (ü):

Geranium dissectum, Luzula multiflora, Ononis spinosa dürften auch früher vorgekommen sein.

3. Neue Arten (n):

Gladiolus paluster (ein paar Exemplare von H. Fenner vor Jahren aus einem Bauerngarten hier eingepflanzt; die Pflanzen gedeihen gut und vermehren sich; einziges Vorkommen dieser in der Schweiz seltenen Art im Lägerngebiet), *Iris sibirica* (ebenfalls von H. Fenner ein Exemplar aus dem Reusstal 1965 hier eingepflanzt; heute finden sich über 30 blühende Stöcke), *Liparis loeselii* (von Rikli im Tiefenmoos vergeblich gesucht, insofern neu für das Lägerngebiet), *Phyteuma orbiculare* (nur wenige Exemplare; bereits Mühlberg: Lägern [wo?]).

4. Sonstwie beachtenswerte Arten:

Cotoneaster tomentosa (Weber, 31. 5. 34; Mü: ohne genaue FO), *Erigeron annuus* (aus Nordamerika eingewandert, bereits um die Jahrhundertwende im

Tabelle 5 Beachtenswerte Arten der Boppelser Weid, einschliesslich Waldränder. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. und J. Ulbrich, K = F. Klötzli und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, <u>1</u> = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben. Die 12 unterstrichenen Arten kommen (bzw. kamen) im ganzen Lägerngebiet nur hier vor. Die 23 mit einem * versehenen Arten werden zwar noch von anderen Stellen angegeben, namentlich vom Furttal (Rikli) und vom Tobel, Egelseesumpf und Nuechtal (alle Gemeinde Obersiggenthal), doch sind sie an diesen Orten ganz verschwunden oder nur in kleinen Populationen vorhanden.

Table 5 Noteworthy species from the area of Boppelser Weid, including the edges of the forest. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. and J. Ulbrich, K = F. Klötzli and FE = F. Egloff. 1 = recorded, <u>1</u> = recorded only from the respective author. The 12 underlined species are (were, respectively) only recorded form here. The 23 names with a * are still recorded from other areas, in particular of Furttal (Rikli) and from Tobel, Egelseesumpf and Nuechtal (all in the community of Obersiggenthal), but they have disappeared or exist only in small populations.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	K	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	K	FE
Agrimonia eupatoria				1		1	*Dianthus armeria*						<u>1</u>
Anacamptis pyramidalis		1		1		v	*Eleocharis palustris s.l.*					1	1
Anagallis arvensis				<u>1</u>			*Epilobium montanum*						<u>1</u>
Anthyllis vulneraria s.l.						<u>1</u>	*Epipactis atropurpurea*				<u>1</u>		v
Aquilegia atrata	<u>1</u>						*Epipactis helleborine*				1		1
Aquilegia vulgaris				1	1	1	*Epipactis palustris*	1			1	1	1
Asperula cynanchia					1	1	*Epipactis purpurata*				<u>1</u>		v
Aster amellus					<u>1</u>		*Equisetum palustre*	1	1			1	1
<u>*Betula pubescens*</u>					1	1	*Erigeron annuus*	<u>1</u>					
<u>*Blackstonia perfoliata*</u>	1	1		1	1	1	*Eriophorum latifolium**	1				1	1
Briza media					1	1	*Euphorbia cyparissias*						<u>1</u>
Bromus erectus					1	1	*Euphrasia rostkoviana*						<u>1</u>
<u>*Buphthalmum salicifolium*</u>				<u>1</u>			*Evonymus europaeus*				<u>1</u>		
Campanula glomerata				1		1	*Frangula alnus*	1					1
Campanula patula				<u>1</u>			*Galium mollugo*					1	1
Campanula rapunculus						<u>1</u>	*Galium uliginosum**					1	1
Campanula rotundifolia						<u>1</u>	*Galium verum*				1	1	1
Campanula trachelium				1		1	*Genista tinctoria*				1		1
*Carex davalliana**	1				1	1	<u>*Gentiana asclepiadea*</u>		1		1		v
<u>*Carex fusca*</u>	1					1	*Gentiana ciliata*				1		1
*Carex hostiana**	1				1	1	*Gentiana cruciata*	1			1		v
Carex panicea	1				1	1	<u>*Gentiana germanica*</u>	1	1	1			v
Carex tomentosa						<u>1</u>	<u>*Gentiana pneumonanthe*</u>	1		1	1	1	1
Centaurea jacea	1	1			1	1	*Gentiana utriculosa*	<u>1</u>					v
Centaurea scabiosa						<u>1</u>	*Geranium dissectum*						<u>1</u>ü
Centaurium pulchellum		1		1			<u>*Gladiolus paluster*</u>						<u>1</u>n
Centaurium umbellatum	1			1	1		*Gymnadenia conopea*	1			1	1	1
Cephalanthera damasonium				1		1	*Gymnadenia odoratissima**	1			1	1	1
Cephalanthera rubra				1		1	*Helianthemum nummul. s.l.*					1	1
Cirsium acaulon	1				1	v	*Herminium monorchis**	1			1		1
Cirsium palustre					1	1	*Hippocrepis comosa*					1	1
Colchicum autumnale	1			1		1	*Hypericum maculatum*		<u>1</u>				
Cotoneaster tomentosa		<u>1</u>					*Hypericum perforatum*				1	1	1
*Crepis paludosa**	1				1	1	*Inula conyza*						<u>1</u>
Daucus carota					1	1	<u>*Inula salicina*</u>					1	1

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	K	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	K	FE
*Iris sibirica**						1n	*Polygala amarella*	1			1	1	1
Juncus inflexus					1	1	*Polygala chamaebuxus*				1		v
Juniperus communis						1	*Polygala vulgaris*				1	1	
Knautia arvensis					1	1	*Potentilla erecta*	1	1			1	1
Koeleria cristata					1	1	*Primula veris s.l.*					1	1
Ligustrum vulgare						1	*Prunella grandiflora*					1	1
Linum catharticum	1	1			1	1	*Prunella vulgaris*					1	1
*Liparis loeselii**						1n	*Pulicaria dysenterica**				1	1	1
Listera ovata	1			1	1	1	*Pyrola rotundifolia*		1				v
*Luzula multiflora**						1ü	*Pyrola secunda*				1		v
Maianthemum bifolium		1				1	*Pyrus communis*						1
Melampyrum pratense				1			*Pyrus nivalis*	1					v
Melittis melissophyllum				1		1	*Reseda lutea*				1		v
Mentha aquatica				1	1	1	*Rhinanthus alectorolophus*		1				1
Menyanthes trifoliata	1					1	*Rhinanthus minor**					1	1
Molinia coerulea s.l.	1				1	1	*Salix nigricans*						1
Myosotis arvensis						1	*Salvia pratensis*					1	1
Neottia nidus-avis				1		1	*Sanguisorba minor*					1	1
Onobrychis viciifolia		1			1	1	*Sanguisorba officinalis*					1	
Ononis repens				1	1	1	*Scabiosa columbaria*					1	1
Ononis spinosa						1ü	*Schoenus ferrugineus**	1				1	1
*Ophioglossum vulgatum**					1	1	*Schoenus nigricans**	1	1			1	1
Ophrys apifera				1		1	*Selinum carvifolia**	1				1	1
Ophrys insectifera				1			*Sieglingia decumbens*					1	1
Ophrys sphecodes	1					v	*Sonchus arvensis*						1
Orchis globosa				1		v	*Spiranthes aestivalis**	1			1	1	1
Orchis incarnata				1	1	1	*Stachys officinalis*	1				1	1
Orchis latifolia				1		1	*Succisa pratensis*	1			1	1	1
Orchis maculata	1			1		1	*Tamus communis*				1		1
Orchis mascula				1			*Taraxacum pal. ssp. pal.**	1				1	1
Orchis militaris				1		1	*Thymus serpyllum s.l.*					1	1
Orchis morio		1		1	1	1	*Tofieldia calyculata**	1	1		1	1	1
Orchis purpurea				1		1	*Tragopogon pratensis s.l.*					1	1
Orchis traunsteineri		1		1	1	1	*Trifolium incarnatum*				1		
*Orchis ustulata**				1		1	*Trifolium medium*					1	1
Origanum vulgare						1	*Trifolium montanum**					1	1
*Parnassia palustris**	1			1	1	1	*Trisetum flavescens*					1	1
Phyteuma orbiculare						1n	*Valeriana dioeca*				1	1	1
Pimpinella saxifraga					1	1	*Veronica persica*						1
*Pinguicula vulgaris**	1			1	1	1	*Veronica teucrium*						1
Platanthera bifolia	1			1	1	1	*Viola hirta*					1	1
Platanthera chlorantha	1			1		1	*Viola tricolor s.l.*				1		

Gebiet vorhanden!), *Gymnadenia odoratissima* (auch weissblühende), *Ophioglossum vulgatum* (im untersten Teil der Weid, ca. 15 m oberhalb des Waldrandes, leicht zu übersehen), *Pinguicula vulgaris* (fast an gleicher Stelle; die letzte grössere Population im Lägerngebiet); weiter *Salix nigricans*, *Sonchus arvensis*, *Succisa pratensis* (alle recht selten, letztere noch im Lätten, Gde. Wettingen). Generell sei

Bild 3 Die Boppelser Weid (unterster Teil mit *Ophioglossum vulgatum* und *Pinguicula vulgaris*, Blick gegen Norden) – der artenreichste Wiesenkomplex des Lägerngebietes

Fig. 3 The Boppelser Weid (the lowest part with *Ophioglossum vulgatum* and *Pinguicula vulgaris*, looking towards the north) – of all meadow areas in the Lägern region the richest in species

hier auf die in der Tabelle unterstrichenen und auf die mit einem * versehenen Arten hingewiesen.

3.24 Harberen südlich Boppelsen (673 0/257 3)

Es handelt sich bei dieser Lokalität um eine durch Hecken, Sumpf- und Trockenstellen vielfältig gegliederte «Matte». Hier einige beachtenswerte Arten, aus Mangel an präzisen älteren Angaben ohne Vergleich mit früher:

Carex davalliana
Carex hirta
Carex hostiana
Carex panicea
Carex tomentosa
Lychnis flos-cuculi
Ophioglossum vulgatum
Orchis militaris
Salix nigricans
Symphytum officinale
Trifolium campestre

Hier ist die wohl wichtigste Fundstelle von *Orchis militaris*, die in recht vielen Exemplaren vorkommt und eine interessante morphologische Vielfältigkeit zeigt. *Ophioglossum vulgatum* und auch die heute recht selten gewordene *Lychnis flos-cuculi* verdienen, hervorgehoben zu werden.

3.25 Das Bernaugebiet (667 0/256 75)

Es handelt sich um eine nach Süden geneigte, von Büschen durchsetzte und auch wegen des nahen Limmatstausees biologisch interessante Wiese. Hier 60 der augenfälligsten Arten, ebenfalls aus Mangel an präzisen älteren Angaben ohne Vergleich mit früher, von denen die unterstrichenen nur hier oder nur noch an ganz wenigen anderen Stellen zu finden sind.

Achillea millefolium
Ajuga genevensis
Andropogon ischaemum
Anthemis tinctoria
Anthyllis vulneraria s.l.
Aquilegia vulgaris
Arenaria serpyllifolia
Bromus erectus
Campanula rapunculus
Centaurea scabiosa
Chrysanthemum leucanthemum
Cornus mas

Coronilla varia
Daucus carota
Dianthus deltoides
Digitalis grandiflora
Echium vulgare
Erigeron annuus
Fragaria vesca
Galinsoga quadriradiata ssp. hispida
Galium aparine
Hieracium pilosella
Himantoglossum hircinum
Hippocrepis comosa
Hordeum murinum
Humulus lupulus
Juglans regia
Knautia arvensis
Lathyrus pratensis
Malva moschata
Matricaria matricarioides
Medicago lupulina
Melandrium album
Melilotus alba
Melilotus officinalis
Onobrychis viciifolia
Ononis repens
Ophrys apifera
Origanum vulgare
Pimpinella major
Potentilla anserina
Potentilla recta
Robinia pseudo-acacia
Rosa canina
Sanguisorba minor
Silene cucubalus
Silene nutans
Sisymbrium officinale
Solanum dulcamara
Stachys officinalis
Stellaria graminea
Teucrium chamaedrys
Thymus serpyllum s.l.
Tragopogon pratensis ssp. minor
Trifolium campestre
Trifolium dubium
Trifolium medium
Trisetum flavescens
Vicia hirsuta
Vicia sativa s.l.

Anthemis tinctoria ist neu für das Lägerngebiet (im Sattel 1986 beobachtet, später verschwunden; einziger Fundort im Gebiet!). *Dianthus deltoides* (nicht mehr als 20 Exemplare; Gartenflüchtlinge?), *Potentilla recta* (ca. 50 Stöcke auf etwa 300 m Wiesenlänge; von A. Zehnder am 10. 8. 74 vom Bahndamm Neuenhof, also aus der Nähe, belegt) und *Tragopogon pratensis ssp. minor* (recht häufig, besonders entlang der Geleise; neu im Gebiet und nur hier!) sind hervorzuheben.

Für *Himantoglossum hircinum* ist diese Lokalität nicht nur die einzige im ganzen Lägerngebiet, ich habe die Art am 6. 6. 90 auch nur in einem einzigen Exemplar gefunden! Man kann sie (die bereits Kölliker «ob Baden» und auch Mühlberg von mehreren Stellen angibt), nach Jahrzehnten des Fehlens, als relativen Neufund bezeichnen (vgl. Kap. 3.22).

3.3 Die nach Süden gerichteten Waldränder

«Ganz besondere Beachtung verdient endlich noch die Vegetation der nach Süden exponierten Waldränder und die Unterflora lichter Waldungen» (M. Rikli, 1907, S. 25). Rikli erkennt in diesen Arten, die eine eigentliche «Ginsterzone» bilden, letzte verarmte pontisch-pannonische Ausstrahlungen. «Es sind meist Arten vor-
gend südlicher oder auch westlicher Areale, die höhere Wärmeansprüche
hen und ohne Nachteil Trockenperioden zu überdauern vermögen.» (l.c. S. 26,
auch Kap. 5.6).

Die Florengeschichte lässt sich nicht auf die Art/Lokalität genau rekonstruieren, Rikli fasst alle diese 18 Südwaldrandarten stets zusammen. Es sind (die 3 Ginster sind unterstrichen):

Asperula cynanchica	*Lathyrus montanus*
Calluna vulgaris	*Linum tenuifolium*
<u>*Cytisus sagittalis*</u>	*Ononis repens*
Festuca heterophylla	*Origanum vulgare*
<u>*Genista germanica*</u>	*Silene nutans*
<u>*Genista tinctoria*</u>	*Teucrium scorodonia*
Geranium sanguineum	*Thymus serpyllum s.l.*
Hieracium sabaudum	*Trifolium medium*
Jasione montana	*Vicia cracca s.l.*

Von diesen habe ich *Festuca heterophylla* (noch von Cu angegeben), *Jasione montana* (Kö: bei Regensdorf; Lü: Kreuzliberg, Neuenhof, Wettingen, Höhtal, Hertenstein, Lengnau, Etel Schneisingen und Egg) und *Linum tenuifolium* (Mü: Lägern; Lü: Scharte, Baden, ob Wettingen, Greppen) nicht mehr auffinden können. *Asperula cynanchica* und *Hieracium sabaudum* sind heute kaum mehr mit den Ginstern vergesellschaftet.

Die in Riklis Arbeit enthaltene «Pflanzengeographische Karte des Lägerngebietes» zeigt mit über 200 Symbolen für die 3 Ginsterarten («*Genista germanica* und *G. tinctoria* fehlen hier beinahe nie, dazu gesellt sich fast immer auch noch der geflügelte Geissklee [*Cytisus sagittalis*]...» M. Rikli, l.c., S. 25) eine grosse Häufigkeit und weite Verbreitung derselben. Auch wenn einzelne Zeichen vielleicht nur kleine Populationen repräsentieren mögen – ein sehr markanter Rückgang der Ginsterarten steht fest.

Ähnlich wie bei den Orchideen lässt sich eine Art Aussterbe-Reihenfolge angeben: Am empfindlichsten ist *Cytisus sagittalis,* gefolgt von *Genista tinctoria,* am wenigsten *Genista germanica* (vgl. Kap. 4 und 5.6).

Noch an mehreren Stellen sind zu finden: *Calluna vulgaris, Lathyrus montanus* und *Teucrium scorodonia,* doch sind auch diese Arten oft nur noch in wenigen Exemplaren und in weit voneinander getrennten Populationen vertreten, und wenn nicht alles täuscht, steht auch ihnen das «Ginster-Schicksal» bevor.

Auf drei an solchen Stellen oder in der Nähe vorkommende, im Lägerngebiet recht seltene Arten möchte ich hier noch speziell hinweisen:

Rumex acetosella kenne ich nur von 2 (bis 3) Lokalitäten: Wettingen, Südseite des äusseren Sulzberges, sandiges Wegbord (668 580/256 860); Häfelerhau (Obersiggenthal), Waldrand oberhalb Parkplatz (665 400/260 110) und Wiesenstück in der Nähe, am ostexponierten Waldrand (665 150/260 120). In Riklis Arbeit wie auch im Welten-Sutter-Atlas fehlt diese Art für das Gebiet, nur im Herbarium von A. Zehnder ist sie vom Häfelerhau (27. 5. 1943) belegt; die Art – nach Mühlberg «gemein» – ist somit relativ neu für das Lägerngebiet.

Hieracium auricula: Auch diese Art kenne ich nur von 2 Stellen: Wettingen, Südseite des äusseren Sulzberges (wie oben) und Kalberweid (Geissberggebiet), Waldrand mit Pferdeweide, ca. 20 Stöcke auf etwa 2 Aren (667 180/260 100). Seit

Kölliker (ohne genauen FO) ist diese Art nicht mehr für das Lägerngebiet angegeben worden (Mü: «gemein»).

Papaver dubium: Rikli fand diese Art *(P. lecoquii)* im damaligen Waldschlag «Bückeli» östlich der Hochwacht, Weber am Bahndamm NOK, 24. 5. 35 und im Rebberg Ennetbaden, 24. 5. 37. Ich kenne sie von der Sulzbergsüdseite an einem Wegbord. (Im Welten-Sutter-Atlas fehlt die Art für das Gebiet.)

Diese 3 Arten sind durch ihre Unscheinbarkeit, durch die für die Gegenwart und das Gebiet unzutreffenden Häufigkeitsangaben in Floren («verbr». bis «hfg».) und durch das Vorkommen an begehrten Wohnlagen gefährdet (vgl. Kap. 6.3).

3.4 Wald

Die Veränderungen in der floristischen Zusammensetzung des Waldes während der vergangenen hundert Jahre scheinen, was die Bäume und grösseren Sträucher betrifft, gering zu sein. Dies betrifft jedoch nur das Artenspektrum, *nicht den Waldhabitus und auch nicht die Häufigkeit einzelner Arten.* Ersterer scheint sich grundlegend gewandelt zu haben. Sowohl Photographien um die Jahrhundertwende als auch die Aussagen älterer ortsansässiger Leute zeigen bzw. beschreiben den früheren Waldwuchs als viel lichter und heller. Mehrere Waldstücke heissen «Weidgang» (z. B. Eigi-Weidgang), und mein im Jahr 1895 geborener Vater hatte es noch erlebt, dass das Vieh in den Wald getrieben und dort frei laufen gelassen wurde. Da dadurch der Jungwuchs immer wieder abgefressen wurde, resultierte ein weniger dichter Kronenschluss – und damit eine stärkere Lichtversorgung des Bodens. Auch Cuny erwähnt diesen Wandel, den er mit der vor etwa 150 Jahren begonnenen Industrialisierung des Lägerngebietes in Zusammenhang bringt: «Die Wälder wurden deshalb seither fast ausschliesslich als Hochwälder zur Bau- und Papierholzgewinnung bewirtschaftet. Niederwälder und Mittelwälder und auch die Waldweiden verschwanden allmählich bis auf kümmerliche Überreste.» (R. Cuny, 1983, S. 58). Bezüglich Konsequenzen für den Naturschutz vgl. Kap. 6.3.

3.41 Bäume und Sträucher

Ich liste hier Riklis Holzpflanzen und Hochstauden des «unteren Bergwaldes», des «oberen Bergwaldes» und des «Heidewaldes» einschliesslich der Arten des Nordabhangs auf, ohne die im Kapitel 3.3 aufgeführten Arten.

Ausser der systematisch nicht unproblematischen *Rosa vosagiaca* (= *R. glauca*, vgl. R. Keller, 1931), die ich als Nicht-Rhodologe möglicherweise übersehen habe, fehlt heute keine einzige Art – im Gegenteil: Rikli schreibt (l.c. S. 44): «Nur an dieser Stelle (gemeint ist der Nordabhang, beim Abstieg zu den Gipsgruben) traf ich *Daphne laureola* in einigen kümmerlichen Exemplaren, und nach H. Angst ... soll hier auch die Eibe *(Taxus baccata)* in einem einzigen, leider wiederholt vergebens gesuchten Exemplar vorhanden sein.» Diese Angaben sind recht erstaunlich: Die Eibe findet sich heute da und dort, auf der Lägernnordseite zwischen Wettingerhorn und Schartenfels und auf dem Hundsbuck sogar in einigen ansehnlichen (angepflanzten?) Populationen, und der lorbeerblättrige Seidelbast kann im

Lägerngebiet geradezu als verbreitet und stellenweise häufig bezeichnet werden (vgl. Kap. 3.22). Etwas weniger deutlich gilt das auch für *Polystichum lobatum*, der nicht mehr, wie Rikli sagt, «der Südseite fehlt».

Über die FO der heute fehlenden und von Rikli nicht von der eigentlichen Lägern angegebenen *Alnus viridis* vgl. Kap. 5.1.

Tabelle 6 Die grösseren Waldpflanzen (Bäume und Sträucher, aber auch grössere und habituell an Sträucher erinnernde Stauden), die Rikli vom Lägernwald i. e. S. angibt. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden (mindestens von einer Lokalität des Lägerngebietes), 0 = keine Belege/Angaben. Die unterstrichenen Arten werden nachfolgend kommentiert. *: vgl. Kap. 4.

Table 6 The woody and more tall plants (in particular trees and shrubs), recorded in Rikli from the Lägern region in a restricted sense (M. Rikli, 1907). R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff). 1 = recorded (at least from one area of the whole region of Lägern), 0 = no records/notes. The underlined species are commented upon hereafter. *: see chap. 4.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Abies alba	1	1	0	0	1	*Picea abies*	1	0	0	0	1
Acer campestre	1	1	1	0	1	*Polygonum dumetorum*	1	0	0	0	1
Acer platanoides	1	0	1	0	1	*Polypodium vulgare*	1	0	0	1	1
Acer pseudoplatanus	1	1	1	0	1	*Polystichum lobatum*	1	1	0	0	1
Aconitum lycoctonum s.l.	1	1	0	0	1	*Pyrus malus*	1	1	1	0	1
Actaea spicata	1	1	0	1	1	*Quercus petraea*	1	0	1	0	1
(Alnus viridis)	(1)	0	0	0	0	*Quercus pubescens**	1	1	1	0	1
Amelanchier ovalis	1	1	0	1	1	*Quercus robur*	1	1	1	0	1
Aruncus dioecus	1	1	0	1	1	*Rhamnus cathartica*	1	1	0	0	1
Astragalus glycyphyllos	1	0	1	1	1	*Ribes alpinum**	1	0	0	0	1
Atropa bella-donna	1	1	0	1	1	*Ribes uva-crispa*	1	1	1	0	1
Berberis vulgaris	1	1	0	1	1	*Rosa pendulina**	1	0	0	0	1
Carpinus betulus	1	1	1	0	1	*Rosa spinosissima**	1	1	0	0	1
*Castanea sativa**	1	0	0	0	1	*Rosa tomentosa*	1	0	0	0	1
Cephalaria pilosa	1	0	1	0	1	*Rosa vosagiaca*	1	0	0	0	0
Clematis vitalba	1	1	0	0	1	*Rubus fruticosus s.l.*	1	1	1	0	1
Cornus sanguinea	1	1	0	0	1	*Sambucus nigra*	1	1	0	0	1
Corylus avellana	1	1	0	0	1	*Sambucus racemosa*	1	0	0	1	1
Cotoneaster integerrima	1	1	1	0	1	*Senecio fuchsii*	1	0	0	0	1
Crataegus monogyna	1	1	1	1	1	*Sorbus aria*	1	1	0	0	1
Crataegus oxyacantha	1	1	0	1	1	*Sorbus aucuparia*	1	1	0	0	1
Daphne laureola	1	0	0	1	1	*Sorbus mougeotii**	1	0	0	1	1
Dipsacus silvester	1	1	0	0	1	*Tamus communis*	1	1	0	1	1
Dryopteris robertiana	1	0	0	0	1	*Taxus baccata*	(0)	0	1	0	1
Evonymus europaeus	1	1	1	1	1	*Tilia cordata*	1	1	0	0	1
Fagus silvatica	1	1	1	1	1	*Tilia platyphyllos*	1	1	1	0	1
Fraxinus excelsior	1	1	0	0	1	*Ulmus scabra*	1	1	0	0	1
Juglans regia	1	1	0	0	1	*Valeriana officinalis*	1	1	0	1	1
Juniperus communis	1	0	0	0	1	*Vicia dumetorum**	1	1	0	0	1
Ligustrum vulgare	1	1	0	1	1	*Vicia silvatica**	1	1	0	0	1
Lonicera alpigena	1	1	1	1	1						

3.42 Das Baderweggebiet

Gemeint ist das Gebiet «längs dem Baderweg, der von Regensberg durch den Wald nach Boppelsen führt» (M. Rikli 1907, S. 25), einschliesslich der weiteren Umgebung, namentlich «Cholholz» und «Riese».

Die Wegränder und lichteren Waldstellen dieses Gebietes können als gute Beispiele für den im Kap. 6.3 genannten Wertwandel wenig beachteter Standorte für lichtbedürftige Arten[1] angesehen werden: einige äusserst seltene Arten des Lägerngebietes sind *nur gerade hier* zu finden!

Tabelle 7 Die 53 beachtenswertesten Arten des Baderweggebietes. R = M. Rikli, FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1 = einzig vom betreffenden Autor angegeben. Die unterstrichenen Arten sind besonders bemerkenswert und werden z. T. anschliessend kommentiert.

Table 7 The 53 most interesting species form the area of Baderweg. R = M. Rikli, FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1 = recorded only by the respective author. The underlined species are particularly noteworthy and some of them are commented upon hereafter.

Name in Binz, 17. A.	R	FE	Name in Binz, 17. A.	R	FE
Agrostis tenuis	1	1	*Juncus effusus*		1
Aquilegia vulgaris		1	*Juncus inflexus*		1
Arctium minus		1n	*Knautia silvatica*		1
Aster amellus	1	v	*Lathyrus silvester*	1	1
Calamagrostis epigeios		1	*Lotus corniculatus*		1
Calluna vulgaris	1	1	*Lotus uliginosus*		1n
Campanula cervicaria	1	1	*Luzula pilosa*		1
Campanula persicifolia		1	*Luzula silvatica*		1
Carex leporina		1ü	*Maianthemum bifolium*		1n
Carex pallescens		1	*Melampyrum pratense*		1
Convallaria majalis		1	*Molinia coerulea s.l.*	1	1
Cypripedium calceolus	1	v	*Petasites albus*		1n
Deschampsia flexuosa		1n	*Potentilla erecta*		1
Dianthus superbus	1	v	*Prunus padus*		1n
Dryopteris limbosperma		1ü	*Pteridium aquilinum*	1	1
Epipactis atropurpurea		1n	*Rosa arvensis*		1
Epipactis helleborine		1ü	*Satureja vulgaris*		1
Epipactis purpurata		1n	*Scirpus silvaticus*		1
Festuca gigantea		1	*Senecio fuchsii*		1
Fragaria vesca		1	*Sonchus arvensis*		1ü
Galium rotundifolium		1n	*Teucrium scorodonia*		1
Genista germanica	1	1	*Trifolium medium*		1
Genista tinctoria	1	v	*Vaccinium myrtillus*	1	1
Gnaphalium silvaticum		1n?	*Veronica arvensis*		1
Hypericum humifusum		1ü	*Veronica officinalis*		1
Hypericum pulchrum	1	1	*Veronica serpyllifolia*		1
Juncus conglomeratus		1n			

[1] Wenn hier nur auf den Standortsfaktor «Licht» Bezug genommen wird, heisst das nicht, dass nicht auch andere Faktoren (namentlich Wärme und Bodenbeschaffenheit) und vor allem die komplexen Wechselwirkungen aller Faktoren eine Rolle spielen; die Helligkeit dieser Lokalitäten ist als Kontrast zum umgebenden Wald jedenfalls augenfällig.

1. Verschwundene Arten (v); in Klammer genauere FO-Angaben bei Rikli (R):
Aster amellus (Riese), *Cypripedium calceolus* (Wolfsgrub bei Regensberg), *Dianthus superbus* (Unterflora der Riese), *Genista tinctoria* (spärlich im Waldgestrüpp der Riese).

2. Neue Arten (n):
Es ist eigenartig, dass R *Agrostis tenuis* (= *vulgaris* = *capillaris*) für «weite Strecken im Bergwald längs dem Baderweg» angibt, die viel häufigere *Deschampsia flexuosa* aber überhaupt nicht (so auch die anderen Quellen); letztere ist neu für das Lägerngebiet. *Arctium minus* fehlt bei R, ist aber da und dort zu finden; Weber belegt sie vom Stadtweiher Baden (1935); sie ist relativ neu für das Lägerngebiet. Auf *Epipactis atropurpurea* (Strassenrand im Cholholz) und *E. purpurata* bin ich im Kap. 3.211 eingegangen. *Galium rotundifolium* ist für das Baderweggebiet neu. *Gnaphalium silvaticum* fand ich noch im Pfeiferholz und bei der Spaltenfluh, bei R fehlt sie; war sie damals zu trivial, um beachtet zu werden, oder ist die Art neu im Baderweggebiet? *Juncus conglomeratus* nennt R aus dem Furttal; sie kommt noch auf dem Buchserberg vor. *Lotus uliginosus* gibt R vom Furttal an; sie ist noch auf dem Buchserberg und im Gchütt zu finden, ist aber sehr viel seltener als *Lotus corniculatus*. *Maianthemum bifolium*, *Petasites albus* und *Prunus padus* fehlen bei R; letztere kommt noch im Österliwald vor und hat Zehnder 1938 aus dem Nuechtal belegt; sie ist relativ neu für das Lägerngebiet.

3. Möglicherweise von R übergangene oder übersehene Arten (ü):
Es sind: *Carex leporina* (R: Furttal, Vertrittpflanze auf Fusswegen im Sumpf; ich kenne sie nur noch vom Pfeiferholz), *Dryopteris limbosperma* = *Aspidium montanum* (R: vgl. Kap. 3.43; in einem zwischen Bader- und Bögliweg gelegenen, stark überwachsenen, hohlwegartigen Waldweg), *Epipactis helleborine* (R: in lichten Föhrengehölzen), *Hypericum humifusum* (fehlt bei R; vgl. Kap. 3.43); *Sonchus arvensis* (nach R muss diese Art um die Jahrhundertwende ein Unkraut im Getreide dargestellt haben; heute ist sie im Gebiet selten, ich fand sie beim Bögliweg, in der Boppelser Weid und südwestlich der Spaltenfluh).

4. Besonders bemerkenswerte Arten:
Campanula cervicaria ist äusserst selten im Lägerngebiet, sie kommt nicht mehr direkt am Baderweg, aber noch in der Nähe vor (vgl. Kap. 4). Von *Genista germanica* existieren noch ein paar kümmerliche Exemplare (vgl. Kap. 3.3 und 4). *Hypericum pulchrum* hat Weber aus dem Greppengebiet belegt (1938), Mühlberg vom Martinsberg angegeben; ich fand sie sonst nur noch bei der Spaltenfluh.

3.43 Kellenholz und Pfeiferholz

Es handelt sich um das Waldgebiet – insbesondere Wegränder und Lichtungen – nordöstlich der Greppe, in der 25 000er Karte (Blatt Baden, Nr. 1070) Pfifferholz und Rütschenholz genannt.

1. Verschwundene Arten (v):
Über *Alnus viridis* vgl. Kap. 5.1. *Cytisus sagittalis* hat Ulbrich im Pfeiferholz noch 1947 finden können. *Dryopteris limbosperma* fand Rikli «an einer einsamen Stelle auf der Nordseite des Kellenholz», und *Saxifraga rotundifolia* gibt er für

Tabelle 8 Beachtenswerte Arten des Kellenholzes und des Pfeiferholzes nordöstlich des Greppengebietes. R = M. Rikli, U = E. und J. Ulbrich, FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1 = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben. Die unterstrichenen Arten sind besonders bemerkenswert und werden z.T. anschliessend kommentiert.

Table 8 Noteworthy species from Kellenholz and Pfeiferholz to the north-east of the area of Greppe. R = M. Rikli, U = E. and J. Ulbrich, FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1 = recorded only from the respective author. The underlined species are particularly noteworthy and are partially commented upon hereafter.

Name in Binz, 17. A.	R	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	U	FE
Alnus viridis	1		v	*Hypericum humifusum*		1	1
Arenaria serpyllifolia			1	*Impatiens glandulifera*			1n
Carex leporina			1	*Lathyrus montanus*			1
Carex pallescens			1	*Mentha arvensis*			1n
Cytisus sagittalis		1	v	*Saxifraga rotundifolia*	1		v
Dryopteris limbosperma	1		v	*Senecio erucifolius*			1
Epipactis purpurata			1n	*Stellaria alsine*	1		1
Equisetum silvaticum			1n	*Teucrium scorodonia*			1
Genista germanica		1	1	*Veronica montana*	1		v
Genista tinctoria		1	1	*Veronica officinalis*			1
Gnaphalium silvaticum			1ü				

Quellenmoore an, «aber nie blühend». *Veronica montana* kenne ich von der Alten Waldpartie und vom Bussberggebiet, nicht aber von hier.

2. Neue Arten (n):

Epipactis purpurata vgl. Kap. 3.211. *Equisetum silvaticum* (entdeckt von meiner Frau am 16. 9. 90: etwa 50 Exemplare auf einer Fläche von ca. 10 x 10 m, Koord. 670 050/257 800; zudem zwischen Greppe und Pfeiferholz, am Wegbord südlich Pt. 516, auf ca. 40 m Länge) und *Impatiens glandulifera* (Wegrand im Kellenholz, etwa 5 Stück) sind neu für das Lägerngebiet, *Mentha arvensis* ist selten.

3. Übersehene oder übergangene (ü) und sonstwie beachtenswerte Arten:

Carex leporina, Gnaphalium silvaticum und *Stellaria alsine* sind im Lägerngebiet recht selten. *Genista germanica* und *G. tinctoria* kommen noch in ein paar kümmerlichen Exemplaren vor, *Cytisus sagittalis* ist verschwunden. *Hypericum humifusum* hat Weber vom Stausee-Ufer (ohne Fundjahr) belegt, Ulbrich fand sie an einem «Waldweg zum Grenzstein, an lichten Stellen», 1956. Dies ist wohl die gleiche Stelle, wo ich sie als Seminarist am 5. 8. 59 gefunden habe; der Fund ist beachtenswert, wird doch die Art vom Lägerngebiet bislang nicht angegeben – ein weiteres Beispiel dafür, dass auch interessierte Schüler und andere Nichtbiologen in der Lage sind, bemerkenswerte floristische Beobachtungen zu machen.

3.44 Das Eislochgebiet

So heisst «ein kleines Isoklinaltälchen, das am Südhang der Lägern innerhalb der steil südfallenden Schichten des Weissen Jura liegt» (A. Güller, 1968, S. 104) und das von der Kantonsgrenze quer durchschnitten wird. Die zitierte Arbeit enthält

nebst geologischen und lokalklimatischen Untersuchungen dieser einmaligen, schützenswerten Stelle auch Angaben von Pflanzenarten, die nachfolgend mit (G) gekennzeichnet sind. Die unterstrichenen Arten werden anschliessend kommentiert.

Adenostyles glabra (G)
Allium ursinum (G)
Asperula odorata
Asplenium ruta-muraria (G)
Asplenium trichomanes (G)
Asplenium viride (G)
Carex digitata (G)
Carex remota
Centaurium umbellatum
Chrysosplenium alternifolium (G)
Convallaria majalis (G)
Cystopteris fragilis (G)
Deschampsia caespitosa
Dryopteris filix-mas (G)
Dryopteris robertiana
Dryopteris spinulosa (G)
Epilobium montanum (G)
Leucojum vernum
Luzula silvatica (G)
Milium effusum
Poa nemoralis (G)
Polypodium vulgare (G)
Polystichum lobatum (G)
Polystichum lonchitis (G)
Scrophularia nodosa
Senecio fuchsii
Teucrium chamaedrys

Güller gibt u. a. noch die folgenden Arten an, doch kann deren heutiges Vorkommen weder für diese Lokalität noch für das ganze Lägerngebiet bestätigt werden: *Anemone (Pulsatilla) vernalis, Asperula taurina, Dryopteris linnaeana (disjuncta), Lonicera nigra* und *Pyrola secunda.*

Asplenium viride wächst an den tiefsten, kältesten Stellen (zudem Grat-Nordseite, vgl. Kap. 3.51). FO von *Centaurium umbellatum:* Rikli: Boppelser Bergwiesen; Zehnder: Nussbaumen, Gebiet um Ebnehof und Ebnegraben, 23. 8. 36 und 13. 7. 47; Ulbrich: Boppelser Weid (1947–56); ich kenne diese im Gebiet zerstreut und nur immer vereinzelt vorkommende Art noch von der Gipsgrube und vom Tägerhard. *Chrysosplenium alternifolium:* Eisloch, an den tiefsten Stellen, zudem im Bannholzgebiet nördlich der Greppe. Von *Leucojum vernum* existieren in den Felsen westlich des Eislochs, auf einer Fläche von etwa 10 Aren, ca. 30 Grüppchen (von hier bereits Lü: Kohlgrube Wettingen, zudem von Ehrendingen), ausserdem in der Alten Waldpartie. Weitere Angaben: Weber: Badenerweg im Wald, 550 m ü. M. (30. 3. 35), Ulbrich: Gratabhang gegen Boppelsen (15. 3. 52) und östlich der Hochwacht beim Durchbruch der Strasse durch den Grat (5. 4. 52). *Polystichum lonchitis* ist eine ausgesprochene Seltenheit im Lägerngebiet. Ich fand ein einziges Exemplar im Eisloch am 17. 7. 85, später aber nicht mehr (ausgegraben?). Weitere FO: 1 Exemplar im Zindelengebiet und mehrere in der Spaltenfluh.

3.5 Felsen und Gratzone

Die Kalkfelsen der Lägern bilden auf lange Strecken einen oft scharfkantigen Grat mit nach Norden teilweise senkrecht stehenden schattigen Felsstufen und nach Süden steil abfallenden sonnigen Felsrippen und -platten. Letztere erreichen stellenweise Flächen von knapp einer bis wenigen Aren und stellen die durch

extreme Standortsbedingungen und eine spezielle Flora gekennzeichneten Felsfluren dar. Zudem finden sich auf der Südflanke der Lägern einige grössere Felsgebiete, von denen die Pfeiferrütifluh im Anschluss an den Grat besprochen werden soll.

3.51 Der Lägerngrat und die angrenzenden Felsfluren

«Lang und ermüdend ist die Gratwanderung von Regensberg nach Baden. Im Hochsommer bei wolkenlosem Himmel und völliger Windstille wird man in Schweiss gebadet, die Zunge klebt am Gaumen, denn nach der Hochwacht ist kein Tropfen Wasser mehr erhältlich» – so schildert M. Rikli (l.c. S. 35). Dem Botaniker empfiehlt er, den Weg in umgekehrter Richtung einzuschlagen, damit er nicht ermüdet ist, wenn er «an die botanischen Glanzpunkte: die Felsfluren beim Burghorn und ob Bussberg...» gelangt. Grat und Felsfluren sind für das Lägerngebiet besonders charakteristisch.

1. Verschwundene Arten (v):

Anthericum liliago hat Rikli «an oft ganz unerreichbaren Stellen ... vom alpinen Apollo umgaukelt» (l.c. S. 28, 38) und Ulbrich noch am 26. 6. 55 auf der Felsflur westlich Schartenfels und im Bussberggebiet finden können. Heute ist diese

Bild 4 Einer der botanischen Glanzpunkte: die Felsflur westlich des Wettingerhorns; Mai-Aspekt, *Hippocrepis comosa* in voller Blüte

Fig. 4 One of the botanical highlights: the rock field, west of the Wettingerhorn; May aspect, *Hippocrepis comosa* in full bloom

wärme- und lichthungrige Trockenheitspflanze aus dem ganzen Lägerngebiet ebenso verschwunden wie dieser Schmetterling (vgl. Kap. 5.6). *Pyrola rotundifolia:* vgl. Kap. 4. *P. secunda:* nach Ulbrich zwischen Hochwacht und Regensberg, Gratnähe bzw. Waldrand, zwischen 1946 und 48. *Ulmus levis* (= *U. pedunculata*): Rikli («einzig längs dem Grat, gegen Baden selten», l.c. S. 62) und Mühlberg als einzige.

Tabelle 9 206 beachtenswerte Arten der Lägerngratzone, einschliesslich der angrenzenden, nach Süden gerichteten, stark beschienenen Felsfluren und der schattigen Nordseite der Felsköpfe. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1̲ = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben. Unterstrichene Arten werden anschliessend kommentiert.

Table 9 206 noteworthy species from the area of the ridge of Lägern, including the adjacent sunny rock fields on the southern slope and the very steep and more shaded northern slope of the rocks. R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1̲ = recorded only by the respective author. The underlined species are commented upon hereafter.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Aconitum lycoctonum s.l.	1				1	*Campanula persicifolia*					1̲
Actaea spicata	1				1	*Campanula rapunculoides*					1̲
Adenostyles cf alliariae					1̲?	*Campanula rotundifolia*	1				1
Adenostyles glabra	1				1	*Campanula trachelium*					1̲
Agropyron caninum	1				1	*Carduus defloratus*	1				1
Allium oleraceum					1̲	*Carex digitata*					1̲
Allium senescens	1		1	1	1	*Carex muricata s.l.*					1̲
Allium ursinum	1			1	1	*Carpinus betulus*	1				1
Amelanchier ovalis	1				1	*Centaurea montana*				1	1
Andropogon ischaemum		1			1(n)	*Centaurea scabiosa*					1̲
Anthemis tinctoria					(1̲)	*Cephalaria pilosa*					1̲
Anthericum liliago	1			1	v	*Chaerophyllum temulum*					1̲
Anthericum ramosum	1			1	1	*Chelidonium majus*					1̲
Arabis alpina	1				1	*Chrysanthemum*					
Arabis hirsuta	1	1			1	*corymbosum*					1̲
Arabis turrita				1	1	*Chrysanthemum*					
Aruncus dioecus	1				1	*leucanthemum*					1̲
Asperula cynanchica	1				1	*Corydalis cava*				1	1
Asplenium fontanum	1				1	*Corylus avellana*	1				1
Asplenium ruta-muraria	1				1	*Cotoneaster divaricata*					1̲n
Asplenium trichomanes	1			1	1	*Cotoneaster integerrima*	1		1		1
Asplenium viride	1				1	*Crataegus monogyna*	1				1
Aster amellus	1				1	*Crataegus oxyacantha*	1				1
Bellidiastrum michelii	1				1	*Crepis foetida*		1̲			
Berberis vulgaris	1				1	*Cynanchum vincetoxicum*	1				1
Bromus benekeni	(1)				1	*Cystopteris fragilis*	1			1	1
Bromus erectus					1̲	*Daphne mezereum*					1̲
Bromus ramosus	1				(1)	*Digitalis grandiflora*					1̲
Bupleurum longifolium	1			1	1	*Digitalis cf lutea*					1̲?

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Epilobium montanum					1
Erigeron canadensis					1
Erodium cicutarium		1	(1)		(1)
Erophila verna					1
Erysimum cheiranthoides					1n
Euphorbia amygdaloides	1				1
Euphorbia cyparissias					1
Euphorbia dulcis					1
Evonymus europaeus	1				1
Fagus silvatica	1				1
Festuca ovina	1	1	1		1
Fragaria vesca					1
Fragaria viridis	1				
Fraxinus excelsior	1				1
Galanthus nivalis	1	1		1	1
Galium aparine					1
Galium cruciata					1n
Galium mollugo					1
Calium pumilum					1
Galium silvaticum	1				1
Geranium columbinum					1
Geranium robertianum					1
Geranium sanguineum	1			1	1
Geum urbanum					1
Glechoma hederacea					1
Helianthemum nummularium s.l.	1			1	1
Heracleum sphondylium s.l.					1
Hieracium murorum					1
Hieracium pilosella					1
Hippocrepis comosa	1				1
Hyacinthoides hispanica					1n
Hypericum hirsutum					1n
Hypericum montanum	1				1
Hypericum perforatum				1	1
Inula conyza	1				1
Juniperus communis	1				1
Knautia arvensis					1
Knautia silvatica					1
Lactuca perennis	1	1	1		1
Laserpitium latifolium	1	1		1	1
Ligustrum vulgare	1				1
Lilium bulbiferum ssp. croceum	1	1		1	1
Lilium martagon				1	1
Lonicera alpigena	1	1	1		1
Mahonia aquifolium					1n
Medicago falcata					1n
Medicago lupulina					1
Melampyrum pratense					1

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Melica ciliata	1				1
Melica nutans					1
Melittis melissophyllum				1	1
Mercurialis perennis	1				1
Moehringia trinervia					1
Muscari racemosum					1
Myosotis arvensis					1
Ononis spinosa					1
Orchis mascula					1
Origanum vulgare	1				1
Orobanche laserpitii-sileris				1	
Orobanche vulgaris	1				
Peucedanum cervaria		1			1
Phyteuma spicatum					1
Picea abies	1				1
Plantago major					1
Plantago media					1
Poa annua					1
Poa compressa	1				1
Poa nemoralis	1				1
Polygonatum multiflorum					1
Polygonatum officinale	1				1
Polygonum aviculare					1
Polygonum dumetorum	1				1
Polypodium vulgare	1			1	1
Polystichum lobatum	1				1
Potentilla sterilis					1
Potentilla verna					1
Prenanthes purpurea					1
Primula elatior				1	1
Primula veris s.l.				1	1
Prunella vulgaris					1
Prunus avium		1			1
Prunus spinosa					1
Pyrola rotundifolia				1	v
Pyrola secunda				1	v
Pyrus communis					1
Pyrus malus	1		1		1
Pyrus nivalis	1				
Quercus petraea	1				1
Quercus pubescens	1		1		1?
Quercus robur	1				1
Ranunculus auricomus					1
Ranunculus bulbosus					1
Rhamnus cathartica	1				1
Ribes alpinum	1				1
Rosa arvensis					1
Rosa canina					1
Rosa dumetorum					1
Rosa pendulina	1				1

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	U	FE
Rosa spinosissima	1	1			1	*Taxus baccata*	1				1
Rosa tomentosa	1				1	*Teucrium chamaedrys*	1				1
Rosa vosagiaca	1					*Teucrium montanum*	1	1			1
Rumex scutatus	1				1	*Thalictrum minus*	1	1			1
Salix caprea	1					*Thesium alpinum*	1				1
Sambucus racemosa	1					*Thlaspi montanum*	1	1	1		1
Satureja acinos	1				1	*Thymus serpyllum s.l.*					1
Satureja calamintha	1					*Tilia cordata*	1				1
Satureja vulgaris					1	*Tilia platyphyllos*	1				1
Saxifraga paniculata	1			1	1	*Trifolium medium*		1			1
Saxifraga tridactylites	1	1			1	*Tunica prolifera*		1		1	1
Scabiosa columbaria					1	*Turritis glabra*					1
Sedum album	1		1	1	1	*Ulmus levis*	1				v
Sedum mite					1	*Valeriana montana*	1				1
Sedum telephium s.l.	1		1		1	*Valeriana officinalis*				1	1
Senecio fuchsii	1				1	*Verbascum lychnitis*		1			1
Seseli libanotis	1				1	*Verbascum thapsus*	1				1
Sesleria coerulea	1				1	*Veronica chamaedrys*	1				1
Silene cucubalus	1				1	*Veronica teucrium*	1			1	1
Silene nutans	1				1	*Vicia cracca*	1				1
Solidago virgaurea					1	*Vicia silvatica*	1				
Sorbus aria	1				1	*Viola alba*				1	1
Sorbus aucuparia	1					*Viola collina*		1	(1)		?
Sorbus mougeotii					1	*Viola hirta*			(1)		1
Stachys recta	1			1	1	*Viola mirabilis*	1				1
Syringa vulgaris		1			1	*Viola silvestris*					1

Neue Arten (n):

Andropogon ischaemum fehlt bei Rikli; Mühlberg: Martinsberg; Weber: Schartenfels, ohne Fundjahr; heute auf der Felsflur westlich vom Schartenfels und im Bernaugebiet recht häufig. *Cotoneaster divaricata* und *Mahonia aquifolium* sind heute an mehreren Stellen im Lägerngebiet zu finden und wohl definitiv eingebürgert (Kap. 5.2); neu für das Lägerngebiet! *Erysimum cheiranthoides* fehlt bei Rikli; Weber: Otelfingen in Gemüsekultur, 28. 8. 37; Zehnder: Neuenhof, zwischen Bahnlinie und Stausee, auch am Bahndamm, 26. 5. 79. Im Hochwachtgebiet fand ich wenige kümmerliche Exemplare, unbeständig. *Galium cruciata* fehlt bei Rikli; Weber: Ehrendingerstrasse, 10. 5. 35; heutige FO: Grat bei Hochwacht und Ruine, Burghorn. *Hyacinthoides hispanica:* 50 m südlich des Burghorns, wohl angepflanzt. *Hypericum hirsutum:* Rikli: u.a. in Waldlichtungen; heute in Waldschlägen z.T. massenhaft. *Medicago falcata* fehlt bei Rikli; Weber: Ehrendingen, 1935; heute: beim Triangulationspunkt (ob noch? vgl. Kap. 6.3).

Taxonomisch problematische Arten (?):

Adenostyles cf alliariae nennt bereits Kölliker («zu oberst auf der Lägern bei 2600', an den Felsen der Nordseite, in Menge») und gibt Rikli vom unteren Bergwald an. Die Pflanzen, die als diese Art angesehen werden können (Wettinger- und Burghorn, besonders Nordseiten), weisen nicht besonders typische Merkmale

auf und müssten als mögliche Bastarde genauer untersucht werden. *Digitalis cf lutea* fand Rikli «an einer einzigen Stelle, unter den östlichen Felsen der Pfeifenrütifluh, jedoch nur in 15 bis 20 Exemplaren am 5. 7. 1903» (l.c. S. 33). An dieser Stelle ist sie nicht mehr zu finden, aber noch beim Steinbuck und beim Burghorn. Auch hier müsste abgeklärt werden, ob es sich um Bastarde handelt; Mühlbergs Angabe («Lägern») von *Digitalis media (D. grandiflora x lutea)* ist bemerkenswert (Kölliker nennt diese Art nicht vom Gebiet). Analoges gilt für *Quercus pubescens*. *Viola collina:* Weber: Lägerngrat, am 3. 5. 35; Zehnder: ein Fund «zwischen *hirta* und *collina*», Gratweg zwischen Burghorn und Hochwacht, 10. 4. 78. Letzteres kann ich bestätigen.

Sonstwie bemerkenswerte Arten (unterstrichene Namen):

Anthemis tinctoria: heute nur noch im Bernaugebiet, vgl. Kap. 3.25. Über *Arabis alpina* und *Asplenium fontanum* vgl. Kap. 4. *Asplenium viride:* Gratnordseite bei der Ruine und beim Burghorn, zudem Eisloch (Kap. 3.44). *Bellidiastrum michelii* nennt Rikli von den Felsfluren, den Felsköpfen der Nordseite, der Pfeifenrütifluh und den Burstwiesen, z. B. der Greppe. Heute kommt sie nur noch in der Gratregion, in nennenswerter Anzahl nur noch am Burghorn vor. *Bromus benekeni/ramosus:* Erstere wurde zu Riklis Zeit als var. von *B. ramosus* betrachtet, deshalb die Klammern um die Eins. *Bupleurum longifolium:* vgl. Kap. 6.1. *Crepis foetida:* Rikli ohne genauen FO; Weber: Lägernkopf (= westlich Schartenfels), 15. 7. 39. *Erodium cicutarium:* vgl. Kap. 4. *Fragaria viridis (F. collina):* nur von Mühlberg (Lägern bei Baden), Rikli und Weber, ohne genaue FO. Über *Galanthus nivalis, Lactuca perennis* und *Lilium bulbiferum ssp. croceum:* vgl. Kap. 4 und 6. *Lilium martagon* nennt Rikli von Waldlichtungen der Nordseite und vom unteren Bergwald, Ulbrich vom Tierpark (zwischen Hochwacht und Regensberg, 1954, «sehr viel»; gilt heute noch!) und vom Burghorngebiet; vgl. Kap. 6.2; sie wird stark durch Wildverbiss beeinträchtigt. *Orobanche laserpitii-sileris:* Ulbrich als einziger: zwischen Hochwacht und Regensberg, Gratnähe bzw. Waldrand, 30. 5. 46. *O. vulgaris (= O. caryophyllacea):* Rikli: Nähe Hochwacht; Ulbrich: Hochwachtgebiet, 8. 2. 47. *Polygonum dumetorum:* von Rikli beim Abstieg zu den Gipsgruben und von Kölliker ob Otelfingen gefunden, heute aber an mehreren Stellen auf dem Grat; scheint sich auszubreiten. *Pyrus nivalis:* Riklis Fundorte: Bolli an der Greppe, Magerwiese ob Herrengut (Bopp. Weid), Abhänge östlich vom Bückeli bei der Hochwacht (vgl. aber Kap. 3.23). Zu *Quercus pubescens, Ribes alpinum, Rosa pendulina, Rumex scutatus* und *Thesium alpinum* vgl. Kap. 4. *Rosa vosagiaca (= R. glauca):* Rikli als einziger, ohne genauen FO. *Saxifraga tridactylites:* Weber: 15. 4. 35 Grat und Burghorn, hier heute selten, vgl. Kap. 5.6. *Syringa vulgaris* kommt in einer kleinblättrigen Form am Felsen ob dem Landvogteischloss vor. Von *Thlaspi montanum,* dieser typischen Westgratpflanze, die bereits Kölliker erwähnt, sagt Rikli: «...als ob der Winter neuerdings eingezogen wäre, bekleidet sich der Grat schon wieder in Weiss. *Thlaspi montanum* eröffnet den Reigen...» (l.c. S. 37); Weber: Schartenfels, 5. 5. 35; Zehnder: Lägerngratpartie, ca. 500 m östlich vom Schartenfels, 20. 4. 60 (vgl. Kap. 6.2). *Turritis glabra* scheint um die Jahrhundertwende im damals lichteren Wald an mehreren Stellen vorgekommen zu sein, Rikli wähnt sie jedenfalls von Waldlichtungen u. ä. Stellen (auch bei Kölliker). Ich

kenne sie nur noch von hier. *Valeriana montana:* vereinzelte kleine Herden zwischen Burghorn und Kantonsgrenze, selten auch auf dem Westgrat (vgl. Kap. 4). *Viola mirabilis:* bereits von Kölliker «Lägern beim Wachthaus»; da und dort auf der Südseite bis zum Grat, auch ob der Goldwand.

Es fällt positiv auf, wie viele Seltenheiten und für die Lägern, pflanzengeographisch gesehen, besonders auffällige Arten noch zu finden sind (Kap. 6.1 und O. Naegeli, 1928, S. 611); allerdings sei bereits hier auf die akute Bedrohung durch Beschattung hingewiesen (Kap. 6.3).

3.52 Die Pfeiferrütifluh (671 5–9/259 3–4)

Der steile Felsabhang, der in der neuen 25000er-Karte nicht mehr angeschrieben ist, wird von einem Weg mit dem vielsagenden Namen «Ballonweg» (er führt vom nicht alkoholfreien Restaurant Hochwacht über ungefährliche Gratabschnitte direkt nach Otelfingen und Wettingen) in einen westlichen und östlichen Teil gegliedert. Er musste vor einigen Jahren wegen bereits erfolgter und weiterer drohender Felsrutsche teilweise neu angelegt werden. Das ganze Gebiet erhält durch die umgestürzten Bäume und die noch kaum bewachsenen Felsbrocken ein wildes Gepräge.

1. Verschwundene Arten (v):

Etliche Arten sind von dieser Lokalität verschwunden, finden sich aber noch in der Gratzone *(Bellidiastrum michelii, Campanula persicifolia, Digitalis cf lutea, Lilium bulbiferum ssp. croceum, Thesium alpinum, Turritis glabra, Valeriana officinalis,* vgl. Kap. 3.51) bzw. an anderen Stellen *(Arctium nemorosum, Dianthus armeria, Carduus nutans, Serratula tinctoria).*

Die folgenden Arten sind nicht nur von dieser Lokalität, sondern aus dem ganzen Lägerngebiet verschwunden: *Dipsacus silvester* (fand ich am «Stumpenweg», zwischen Alter Waldpartie und Sattel, noch am 15. 8. 60, heute aber nirgends mehr wild). *Lathyrus heterophyllus* fand Rikli (und vielleicht bereits Mühlberg: «Lägern ob Otelfingen») hier «an einer engbegrenzten Stelle, aber in unglaublicher Menge» (l.c. S. 31). Analoges gilt für *L. tuberosus.* Für beide Arten vgl. Kap. 5.6. *Pyrola secunda* und *Teucrium botrys* konnte ich ebenfalls nicht mehr auffinden; erstere wird noch in WS, letztere von Weber (Bahnareal Wettingen, 25. 7. 34) und von Cuny angegeben.

Neue Arten an dieser Lokalität (n):

Arabis alpina fand bereits Ulbrich «in den Schutthalden» am 25. 4. 53, wo sie heute noch auf einer Fläche von etwa 1 Are vorkommt. Rikli hätte von dieser Art gewiss Notiz genommen, hätte es sie damals hier gegeben (vgl. Kap. 4). *Cotoneaster horizontalis* kommt hier in mehreren Exemplaren vor und ist auch noch an anderen Stellen zu finden; die Art ist neu für das Lägerngebiet (Kap. 5.2) und scheint sich auszubreiten. *Epilobium angustifolium* fehlt in Riklis Arbeit eigenartigerweise vollständig. Ist diese heute nicht seltene Art ebenfalls in Ausbreitung begriffen?

Tabelle 10 Bemerkenswerte Arten der Pfeiferrütifluh, Riklis «Fuss der Pfeifenrütifluh» miteingeschlossen. R = M. Rikli, U = E. und J. Ulbrich, FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1̲ = einzig vom betreffenden Autor angegeben. Die unterstrichenen Arten werden anschliessend kommentiert.

Table 10 Noteworthy species from the area of Pfeiferrütifluh, including the food of the rocks. R = M. Rikli, U = E. and J. Ulbrich, FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1̲ = recorded only by the respective author. The underlined species are commented upon hereafter.

Name in Binz, 17. A.	R	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	U	FE
Aconitum lycoctonum s.l.			1̲	*Lactuca perennis*			1̲ü
Adenostyles glabra			1̲	*Laserpitum latifolium*	1		1
Allium senescens			1̲	*Lathyrus heterophyllus*	1̲		v
Alyssum montanum	1		1	*Lathyrus montanus*			1̲
Anthericum ramosum			1̲ü	*Lathyrus tuberosus*	1̲		v
Arabis alpina		1	1(n)	*Lilium bulbiferum ssp. croceum*	1	1	v
Arabis hirsuta			1̲	*Lonicera alpigena*			1̲
Arabis turrita	1		1	*Lonicera xylosteum*			1̲
Arctium nemorosum	1̲		v	*Melica ciliata*			1̲
Asperula cynanchica			1̲	*Picris hieracioides*	1		1
Asplenium fontanum	1		1	*Pimpinella major*			1̲
Astragalus glycyphyllos			1̲	*Polygonatum officinale*		1	1
Bellidiastrum michelii	1̲		v	*Polypodium vulgare*			1̲
Campanula persicifolia	1̲		v	*Pyrola secunda*		1̲	v
Campanula rapunculoides			1̲	*Quercus petraea*			1̲
Campanula rotundifolia			1̲	*Ribes uva-crispa*	1		1
Campanula trachelium	1		1	*Rosa arvensis*			1̲
Carduus defloratus	1	1	1	*Rosa canina*			1̲
Carduus nutans	1̲		v	*Rubus saxatilis*			1̲
Carex muricata s.l.	1		1	*Sambucus ebulus*			1̲
Chrysanthemum corymbosum	1		1	*Satureja calamintha*			1̲
Convallaria majalis	1	1	1	*Sedum album*			1̲
Cotoneaster horizontalis			1̲n	*Senecio fuchsii*			1̲
Cotoneaster integerrima			1̲	*Serratula tinctoria*	1̲		v
Cystopteris fragilis			1̲	*Seseli libanotis*			1̲
Daphne mezereum			1̲	*Silene cucubalus*	1		1
Dianthus armeria	1̲		v	*Solidago virgaurea*			1̲
Digitalis cf lutea	1̲		v	*Stachys alpina*			1̲
Dipsacus silvester	1̲		v	*Teucrium botrys*	1̲		v
Dryopteris filix-mas			1̲	*Teucrium montanum*			1̲
Dryopteris robertiana			1̲ü	*Teucrium scorodonia*			1̲
Dryopteris spinulosa			1̲	*Thalictrum minus*	1		1
Epilobium angustifolium			1̲n	*Thesium alpinum*	1̲		v
Epilobium montanum	1		1	*Turritis glabra*	1̲		v
Eupatorium cannabinum			1̲	*Valeriana officinalis*	1̲		v
Geranium sanguineum			1̲	*Verbascum thapsus*			1̲
Hypericum hirsutum	1		1	*Vicia cracca s.l.*	1		1
Hypericum montanum	1		1	*Vicia dumetorum*			1̲
Inula conyza			1̲	*Vicia silvatica*	1		1
Knautia silvatica			1̲	*Viola mirabilis*			1̲

Wahrscheinlich übersehene oder übergangene Arten (ü):
Anthericum ramosum und *Dryopteris robertiana* dürften schon um die Jahrhundertwende hier vorgekommen, aber als damalige Trivialarten übergangen worden sein, und auch *Lactuca perennis* dürfte hier kaum neu sein.

Besonders beachtenswert sind an dieser Stelle *Alyssum montanum* und *Asplenium fontanum* (vgl. Kap. 4 und 6.1).

3.6 Das Gipsgrubengebiet

Kleingewässer, Wald, Felsen, Weiden, Sumpf-, Trocken- und Mähwiesen bilden hier eine abwechslungsreiche vielgliedrig-hügelige Landschaft. Wie der Name verrät, wurde hier Bau- und Düngergips gewonnen, es bestand eine Zementfabrik und in der Nähe drehten Gipsmühlen. Geologisch bildet diese Lokalität – dieser «zu Stein erstarrte Regenbogen» – den Kern des Lägerngewölbes aus buntem Keuper (vgl. G. Senftleben, 1923).

Bild 5 Die Gipsgrube, Oberehrendingen, zwischen 1893 (Photo aus A. Heim, Bd. 1, S. 459) und 1991. Der Wald hat nicht nur von den Abbaustellen Besitz ergriffen, er scheint generell dichter geworden zu sein (zu sehen oben rechts im Bild).

Fig. 5 The Gipsgrube, Oberehrendingen, between 1893 (photo from A. Heim, Bd. 1, p. 459) and 1991. The wood has taken possession not only of the quarry, it seems generally to have grown in density (to be seen at above right).

Tabelle 11 Bemerkenswerte Arten des Gipsgrubengebietes, einschliesslich Malzhalde, Rütenen, Schürwiesen. R = M. Rikli, W = J. Weber, U = E. und J. Ulbrich und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1 = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben. Unterstrichene Arten werden anschliessend kommentiert.

Table 11 Noteworthy species from the area of Gipsgrube, including Malzhalde, Rütenen, Schürwiesen. R = M. Rikli, W = J. Weber, U = E. and J. Ulbrich and FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1 = recorded only by the respective author. The underlined species are commented upon hereafter.

Name in Binz, 17. A.	R	W	U	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	U	FE
Actaea spicata		1		1	*Gymnadenia conopea*				1
Agrimonia eupatoria				1	*Juncus alpinus*				1
Alchemilla vulgaris s.l.				1	*Juncus articulatus*				1
Alnus glutinosa				1	*Juncus bufonius*				1
Alnus incana				1	*Koeleria cristata*				1
Antennaria dioeca	(1)				*Leontodon hispidus*				1
Asplenium viride			1	v	*Lilium martagon*				1
Botrychium lunaria	1			v	*Linum catharticum*				1
Briza media				1	*Listera ovata*				1
Bromus benekeni		1		1	*Malva silvestris*				1
Bromus ramosus				1	*Molinia coerulea s.l.*				1
Carex panicea				1	*Neottia nidus-avis*				1
Carlina vulgaris				1	*Ononis repens*				1
Carum carvi				1	*Ophrys insectifera*		1		
Centaurea montana				1	*Orchis mascula*				1
Centaurium umbellatum				1	*Orchis purpurea*		1	1	1
Cephalanthera rubra		1			*Peucedanum cervaria*				1
Chrysanthemum maritimum				1	*Picris hieracioides*				1
Coeloglossum viride	1			v	*Polygala vulgaris*				1
Colchicum autumnale				1	*Polygonum cuspidatum*				1n
Cotoneaster horizontalis				1n	*Potentilla erecta*				1
Cypripedium calceolus			1	v	*Pyrus malus*				1
Daphne mezereum				1	*Salix alba*				1
Epipactis atropurpurea		1		1	*Salvia verticillata*		1		v
Epipactis helleborine				1	*Solidago virgaurea*				1
Equisetum palustre				1	*Succisa pratensis*				1
Equisetum telmateia				1	*Tragopogon pratensis s.l.*				1
Euphrasia rostkoviana				1	*Trifolium medium*				1
Festuca gigantea				1	*Valeriana dioeca*				1
Fragaria vesca				1	*Vicia pannonica*		1		v
Geranium palustre				1					

Verschwundene Arten (v):

Asplenium viride: Ulbrich, Gipsgrube, 29. 11. 47 (Bestimmung?). Die folgenden Arten sind nicht nur von hier, sondern aus dem ganzen Lägerngebiet verschwunden: *Botrychium lunaria:* Rikli: «...auf der Malzhalde gruppenweise an feuchteren Stellen bei ca. 590 m; Jäggi fand im Juli 1881 die Mondraute auch auf einer Waldwiese zwischen Regensberg und der Hochwacht...» (l.c. S. 46). *Coeloglossum viride:* Kölliker und Mühlberg: «Nordseite der Lägern»; Rikli: «Jäggi fand im Juli

1881 ... die Hohlzunge ... auf den frischen Bergwiesen der Malzhalde, zerstreut, aber sehr reichlich, von 650–560 m herabsteigend. Diese Pflanze wurde von Frau Dr. M. Brockmann auch auf den hinteren Schürwiesen gesammelt (Mai 1903)» (l.c. S. 46). Rikli zitiert noch weitere FO; es ist nicht klar ersichtlich, ob er diese damals schon seltene Art selber gefunden hat (vgl. auch Kap. 5.6). *Salvia verticillata:* Weber: nördlicher Rand der Gipsgrube, 30. 6. 40 (Gartenflüchtling?). *Vicia pannonica:* Weber: Zementfabrik Gipsgrube, 1934 (Gartenflüchtling?). *Cypripedium calceolus:* Ulbrich: «rechts ob der oberen Grube, 29. 11. 52»; nach WS noch selten im Gebiet; ich konnte die Art nicht mehr auffinden.

Neue Arten (n):

Cotoneaster horizontalis und *Polygonum cuspidatum* müssen als eingebürgert angesehen werden, besonders letztere scheint sich im Gebiet von Jahr zu Jahr mehr auszubreiten.

Weitere beachtenswerte Arten:

Antennaria dioeca nennt bereits Kölliker («Lägern») und Rikli u. a. von «lichten Föhrengehölzen», ohne ausdrückliche Angabe der Gipsgrube. Sie scheint nur noch hier vorzukommen. Die im Lägerngebiet recht seltene *Carum carvi* kommt auf der Malzhalde vor.

3.7 Die «Antilägern»

Rikli bezeichnet den Geissberg bei Baden, das Bollhölzli und den Steinbuck zusammen als «Antilägern» und stellt fest: «Auch die Flora der Antilägern ist gewissermassen eine verkleinerte Auflage derjenigen des Lägerngrates» (l.c. S. 47). Ich schliesse hierin auch noch das Hertensteingebiet, die Goldwand, den Haselbuck und die Kalberweid mit ein.

Verschwundene Arten (v); * = von mir im ganzen Lägerngebiet nicht mehr beobachtet:

Cytisus sagittalis, von Weber noch von der Kalberweid belegt (5. 6. 35, fehlt heute) und *Genista germanica*, von ihm vom Haselbuck am 13. 5. 34 gefunden, zeigen das «Ginster-Schicksal» (vgl. Kap. 3.3 und 4). *Dianthus carthusianorum** wird einzig von Rikli für das Lägerngebiet angegeben; Gartenflüchtling? *Portulaca oleracea*:* Rikli: Unkraut in Reben, in der Nähe von Otelfingen; Weber: Goldwand, Hertenstein, 15. 9. 34. *Sarothamnus scoparius:* Rikli: Egg bei Niederweningen und Kalberweid. Weber: Haselbuck, 13. 5. 34, Riklis Fundort? Heute auf der Kreuzlibergkuppe. *Turritis glabra* kenne ich nur noch vom Burghorn (Kap. 3.51).

Bemerkenswerte Arten

Carex halleriana: vgl. Kap. 4. *Epilobium dodonaei:* Rikli: Bahnhof Steinmaur und Kalkschutt in den Steinbrüchen (l.c. S. 64); Ulbrich: Steinbruch unterhalb Regensberg, 1948 bis 52, Lägernalp, 20. 8. 57. Zu *Genista tinctoria* (die zweitseltenste Art der drei Ginster) und *Geranium palustre* (nach Rikli «eine seltenere Erscheinung») vgl. Kap. 4, zu *Hieracium auricula* (eine von zwei Fundstellen!) vgl. Kap. 3.3. *Lathyrus niger:* vom Geissberg von Rikli und Weber (14. 6. 35) belegt. *Lilium martagon*, da und dort im Gebiet zu finden, mit bemerkenswerten Häufun-

Tabelle 12 Charakteristische Arten der «Antilägern» (Geissberg, Bollhölzli, Steinbuck). R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder und FE = F. Egloff. 1 = vorhanden, 1̲ = einzig vom betreffenden Sammler/Autor belegt/angegeben. Unterstrichene Arten werden anschliessend kommentiert.

Table 12 Typical species of the «Antilägern» (so-called by Rikli: Geissberg, Bollhölzli, Steinbuck). R = M. Rikli, W = J. Weber, Z = A. Zehnder and FE = F. Egloff. 1 = recorded, 1̲ = recorded only by the respective author. The underlined species are commented upon hereafter.

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	FE
Achillea millefolium				1̲	*Dianthus barbatus*				1̲
Aesculus hippocastanum				1̲	*Dianthus carthusianorum*	1̲			v
Agrimonia eupatoria				1̲	*Digitalis lutea*				1̲
Ajuga genevensis			1̲		*Echium vulgare*		1̲		
Allium oleraceum				1̲	*Epilobium dodonaei*				1̲
Allium sativum		1̲			*Epilobium hirsutum*				1̲
Allium senescens				1̲	*Epilobium montanum*				1̲
Amelanchier ovalis				1̲	*Erigeron annuus*				1̲
Arabis hirsuta				1̲	*Euphorbia amygdaloides*	1̲			
Arabis turrita	1̲				*Euphorbia verrucosa*				1̲
Asperula cynanchica				1̲	*Galeopsis tetrahit*		1̲		
Bromus erectus				1̲	*Galium aparine*				1̲
Campanula glomerata				1̲	*Galium mollugo*				1̲
Campanula persicifolia		1̲			*Galium verum*		1̲		
Campanula rapunculoides				1̲	*Genista germanica*		1̲		v
Campanula rapunculus		1		1	*Genista tinctoria*		1		1
Campanula rotundifolia				1̲	*Geranium palustre*			1	1
Campanula trachelium				1̲	*Geranium sanguineum*				1̲
Carex caryophyllea			1̲		*Helianthemum*				
Carex digitata			1̲		*nummularium*				1̲
Carex flacca		1		1	*Heracleum sphondylium s.l.*				1̲
Carex halleriana	1	1		1	*Hieracium auricula*				1̲
Carex muricata s.l.				1̲	*Hieracium pilosella*				1̲
Centaurea jacea				1̲	*Hieracium piloselloides*		1̲		
Centaurea scabiosa				1̲	*Hieracium umbellatum*		1̲		
Chrysanthemum					*Hippocrepis comosa*				1̲
corymbosum	1			1	*Hypericum montanum*				1̲
Chrysanthemum					*Hypericum perforatum*				1̲
leucanthemum				1̲	*Hypochoeris radicata*				1̲
Cichorium intybus				1̲	*Ilex aquifolium*				1̲
Cirsium vulgare				1̲	*Koeleria cristata*			1̲	
Colchicum autumnale		1		1	*Lactuca serriola*			1	1
Cornus mas				1̲	*Lamium galeobdolon*				1̲
Cotoneaster integerrima				1̲	*Laserpitium latifolium*	1̲			
Crataegus monogyna			1	1	*Lathyrus montanus*				1̲
Crataegus oxyacantha				1̲	*Lathyrus niger*	1	1		1
Crepis biennis				1̲	*Lathyrus pratensis*				1̲
Crepis vesicaria ssp.					*Lathyrus silvester*		1̲		
taraxacifolia				1̲	*Leontodon hispidus*		1		1
Cynanchum vincetoxicum				1̲	*Ligustrum vulgare*				1̲
Cytisus sagittalis		1̲		v	*Lilium martagon*				1̲
Daucus carota				1̲	*Linum catharticum*				1̲

Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	FE	Name in Binz, 17. A.	R	W	Z	FE
Melampyrum cristatum				1	*Sanguisorba minor*				1
Melandrium album				1	*Sarothamnus scoparius*		1		v
Melilotus officinalis				1	*Satureja acinos*				1
Onobrychis viciifolia				1	*Satureja calamintha*				1
Ononis repens				1	*Satureja vulgaris*				1
Orchis mascula			1		*Sedum album*		1		1
Orchis morio			1		*Seseli libanotis*	1			1
Origanum vulgare				1	*Sesleria coerulea*				1
Peucedanum cervaria				1	*Silene cucubalus*				1
Phyllitis scolopendrium				1	*Solidago virgaurea*				1
Picris hieracioides				1	*Sonchus asper*				1
Pimpinella major				1	*Sorbus aria*		1		1
Poa compressa				1	*Sorbus torminalis*			1	
Polygonatum officinale		1		1	*Stachys recta*	1			1
Populus tremula			1		*Stellaria graminea*				1
Portulaca oleracea		1		v	*Teucrium chamaedrys*				1
Potentilla reptans				1	*Teucrium scorodonia*				1
Primula veris			1		*Thlaspi arvense*		1		
Prunella vulgaris				1	*Thlaspi montanum*				1
Prunus avium				1	*Thlaspi perfoliatum*			1	
Prunus spinosa				1	*Tilia platyphyllos*			1	
Quercus petraea			1		*Tragopogon pratensis s.l.*		1		1
Quercus pubescens	1				*Trifolium medium*				1
Quercus robur			1	1	*Turritis glabra*	1			v
Ranunculus bulbosus			1	1	*Verbascum lychnitis*				1
Rhamnus cathartica				1	*Verbascum thapsus*				1
Rhinanthus alectorolophus				1	*Verbena officinalis*				1
Ribes uva-crispa		1		1	*Veronica chamaedrys*		1		
Rosa canina		1		1	*Veronica persica*				1
Rubus idaeus				1	*Vicia cracca*	1			1
Rumex acetosa				1	*Vicia dumetorum*				1
Salix caprea				1	*Vicia silvatica*				1
Salvia pratensis				1	*Vicia tetrasperma*				1
Sambucus ebulus		1	1	1	*Vinca minor*				1
Sambucus nigra		1			*Viola alba*		1		
Sambucus racemosa				1					

gen (vgl. Kap. 6.2). *Melampyrum cristatum:* nach Rikli «selten bei Wettingen»; bereits von Mühlberg oberhalb Wettingen angegeben; von mir nur am Steinbuck beobachtet. *Peucedanum cervaria, Phyllitis scolopendrium* (an Felsen im Goldwand-Bachtobel) und *Poa compressa* sind im Gebiet recht selten.

4 Lokalhistorisch bedeutsame Arten

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, bildete die Lägern ein beliebtes Exkursionsziel von Fachbotanikern der nahegelegenen Zürcher Hochschulen und von Ama-

teuren, die hier floristische Beobachtungen gemacht und dokumentiert haben. Arten, die in *älteren Quellen* (im vorliegenden Fall insbesondere in Riklis Arbeit, vgl. Kap. 2) von *bestimmten Fundstellen* angegeben oder belegt sind und *heute noch* an diesen Lokalitäten vorkommen, werden hier als *lokalhistorisch bedeutsam* definiert. Dabei handelt es sich einerseits um Arten, für die das Lägerngebiet *regional oder gesamtschweizerisch* gesehen ein wichtiges Vorkommen bedeutet (Kap. 6.1), andererseits um solche, die *im Gebiet* – auch wenn sie anderswo häufig sein mögen – *selten bis sehr selten* sind und oft nur noch durch *kleine Populationen* von kaum einem bis wenigen Quadratmetern Fläche, gelegentlich sogar von *einzelnen Individuen,* repräsentiert werden. Eine einmalige Holzdeponie, eine kleine Wegbordsanierung oder sonst eine ähnliche, lokal eng begrenzte und weiter kaum beachtete Aktivität an einer solchen Stelle, *und es verschwinden nicht nur ein paar Individuen von dort, sondern eine Art aus dem ganzen Lägerngebiet!* Der Schutz und die Existenzsicherung dieser Arten erhält somit eine *historische*, durch die Würdigung und Weiterführung menschlicher Forschungsarbeit eine über den reinen Arten- und Biotopschutz hinausgehende *kulturhistorische* Dimension; *hier geht es um den Erhalt der Einmaligkeit, ja Individualität von Art, Ort, Zeit und Kulturtradition.* (Vgl. auch Kap. 6.3).

Die Aufstellung der 37 – zugegebenermassen etwas subjektiv ausgewählten – Arten erfolgt alphabetisch. (Karte) bedeutet, dass die betreffende Art in Riklis pflanzengeographischer Karte des Lägerngebietes eingezeichnet ist. Im weiteren sind die Namen der betroffenen oder doch tangierten Gemeinden (Gde.) und unter WS die Kartennummer im Verbreitungsatlas (M. Welten und R. Sutter, 1982, Kartierfläche der Lägern: Nr. 402) beigefügt. FO = Fundort(e).

Alyssum montanum (Berg-Steinkraut)

Rikli (Karte): «...schmückt... einige verborgene Stellen der Pfeifenrütifluh...» (l.c. S.38); bereits Kölliker: «an der Felswand der Lägern ob Otelfingen» und Mühlberg: Lägern bei Otelfingen. Dies gilt heute noch: *einziger FO im Lägerngebiet!* Gde. Otelfingen. WS: Nr. 531, selten in 402.

Arabis alpina (Alpen-Gänsekresse)

Rikli (Karte): «... nur an den Felsen der Nordseite, westlich der Hochwacht, auf einer kleinen Strecke von ca. 400 m ... ca. 830–850 m ...» (l.c. S. 67); er erwähnt den Exkursionsbericht von O. Heer vom 25. 4. 1836, in welchem diese Art zum erstenmal von der Lägern genannt wird. Köllikers Angabe «auf dem Grathe der Lägern, auf der Nordseite bei 2600'» bezieht sich wahrscheinlich auf die gleiche Stelle. *Diese bemerkenswerte Population existiert heute noch!* Gde. Schleinikon, Otelfingen. Weitere FO: Fuss der östlichen Pfeiferrütifluh (vgl. Kap. 3.52) und Teufelskeller, beim «Turmfelsen», Gde. Baden. WS: Nr. 525, selten in 402.

Arctium nemorosum (Hain-Klette)

Rikli: Nordabhang beim Abstieg zu den Gipsgruben (l.c. S. 44). Heute noch hier und westlich davon. Gde. Unter- und Oberehrendingen. WS: Nr. 1861, fehlt 402.

Asplenium fontanum (Hallers oder Brunnen-Streifenfarn)

Mühlberg: «...an der Lägern nur an einer Stelle an einer isolirten Felswand ob Otelfingen (Jäggi)», womit wohl die Pfeiferrütifluh gemeint ist. *Heute noch hier!* Nach Rikli (Karte) das nordöstlichste jurassische Vorkommen, was mit WS (Nr. 43)

übereinstimmt. Gde. Otelfingen. Neue FO: beim Wettingerhorn (von hier bereits Weber: Malm-Absturz Wettinger Gugel [= Wettingerhorn], ca. 150 m unterhalb Grat, 15. 6. 42) und, diesem gegenüber, an einem Felsband am blauen Weg, etwa 80 m unterhalb des Grates (Kap. 3.51). Gde. Wettingen.

Bupleurum longifolium (Langblättriges Hasenohr)

Rikli (Karte): «... eine Pflanze, die sich streng an den Grat hält, nur ausnahmsweise geht sie mehr als 70 m unter die Kammlinie» (l.c. S. 34). Dies gilt heute noch für diese auf dem Grat recht häufige, bezogen auf die ganze Schweiz aber seltene Art (Kap. 6.1). Kölliker: «auf den Lägern». Gde. Wettingen, Otelfingen, Boppelsen, Schleinikon, Niederweningen, Unterehrendingen, Oberehrendingen, Ennetbaden. WS: Nr. 1160.

Campanula cervicaria (Borstige Glockenblume)

Rikli: «... im Bergwald längs dem Baderweg zwischen Regensberg und Boppelsen» (l.c. S. 17). Heute in diesem Gebiet nur noch wenige, *wohl die letzten Exemplare des Lägerngebietes:* Waldstrassenbord im Cholholz (von hier bereits Lüscher!), oberhalb Reservoir und an der oberen Strasse (673 600/258 920), die meisten (am 11. 7. 90) von Rehen abgefressen. Gde. Boppelsen, Regensberg. WS: Nr. 1693, fehlt 402.

Cardamine pentaphyllos (Fingerblättrige Zahnwurz)

Rikli: *(Dentaria digitata)* am Martinsberg (l.c. S. 47); von hier Weber: 20. 4. 35 und auch Lüscher. Heute noch hier (Nordabhang), der *einzigen Fundstelle* im weitgefassten Lägerngebiet, hier aber häufig. Gde. Baden. WS: Nr. 494, fehlt 402, aber in 351.

Carex halleriana (Grundstielige Segge)

Rikli (Karte): am Geissberg und ob der Goldwand; Weber: Hertenstein und Martinsberg-Südhang, 20. 4. 39; auch Lüscher: 1912. Die Art kommt heute immer noch hier, aber *nur noch an einer einzigen engbegrenzten Stelle,* an der nach Südwesten gerichteten Felskante des Geissbergs (Hertenstein), vor (665 880/ 259 620). Vom Martinsberg und von der Goldwand ist sie verschwunden (vgl. Kap. 5.6). Gde. Ennetbaden. WS: Nr. 2476, fehlt 402 und 401.

Castanea sativa (Edelkastanie)

Rikli: «...offenbar als Überbleibsel früherer Kultur, vollständig verwildert im Walde...» und weiter: «Östlich von der «Härtern» beim Sulzberg (Wettingen) steht ein alter Strunk, aus dem fünf kräftige, wohl 8–10 m hohe Stämme, die alljährlich blühen, emporsprossen» (l.c. S. 15). Einen solchen Strunk (wohl diesen: 668 640/257 400) gibt's heute noch! Allerdings sind die paar Stockausschläge nur mehr einige Dezimeter hoch. Gde. Wettingen. Ein stattlicher Baum befindet sich in der gleichen Gemeinde im Gchütt, am Strassenrand (668 800/256 750). WS: Nr. 140, Literaturangabe für 402.

Cytisus sagittalis (Flügelginster)

Rikli (Karte für alle 3 Ginsterarten): U. a. nach Süden exponierte Waldränder (Kap. 3.3). Heute nur noch an *einer einzigen Stelle,* am SW-Waldrand des Gmeumeri-Waldes, unmittelbar hinter den beiden Häusern (Gde. Würenlos, 668 900/ 256 300); etwa 6 kleine Populationen von je einem Viertelquadratmeter Grösse, auf einer Waldrandlänge von 8 m; *wohl die letzten des Lägerngebietes.* Beim Häfeler-

hau, wo A. Zehnder die Art noch 1943 hat finden können (im Herbar ist allerdings nur die Etikette vorhanden), im Pfeiferholz (Ulbrich: 14. 6. 1947) und auf der Kalberweid (Weber: 5. 6. 1935) kommt sie nicht mehr vor. Vielleicht bezieht sich Mühlbergs Angabe «Würenlos» auf *diesen* FO. WS: Nr. 793.

Erodium cicutarium (Gemeiner Reiherschnabel)

Nach Rikli ein Anthropochor auf Bahngeleisen. Mühlberg: «Lägern bei Baden» (bereits damals «nicht häufig»!); Weber: «Lägernkopf», 10. 5. 35; Zehnder: «Rebberg neben dem Schartenfels», 22. 5. 60; alle diese Angaben betreffen etwa die gleiche Stelle und hier ist diese im Gebiet recht seltene Art *heute noch*, besonders im Rebberg, zu finden. Gde. Baden, Ennetbaden, Wettingen. WS: Nr. 951.

Galanthus nivalis (Schneeglöckchen)

Rikli: «Als ersten Frühlingsherold sammeln wir im Buschwald beim Burghorn das Schneeglöckchen... wohl einen vollen Monat früher als in den Gärten Zürichs» (l.c. S. 60). Von hier wird diese Pflanze bereits von Kölliker («...ob Otelfingen gegen das Burghorn bis zu 2600' in grosser Menge am 3. März 1839 auf einer Turnfahrt gefunden...») und Mühlberg angegeben und ist *bis heute sozusagen lückenlos belegt:* Weber: Februar 35, Ulbrich: 1947–52. Auch östlich vom Burghorn existieren einige mehrere Quadratmeter grosse Herden. Gde. Wettingen, Otelfingen. WS: Nr. 2118, Nachtrag.

Genista germanica (Deutscher Ginster)

Rikli (Karte für alle 3 Ginsterarten): U. a. nach Süden exponierte Waldränder (vgl. Kap. 3.3). Heute kommt diese Art nur noch in meist recht kümmerlichen Exemplaren vor, ist aber von allen 3 Ginsterarten noch die häufigste. FO: Waldrand, obere Lätte (Gde. Wettingen, 668 680/258 490), Baderweg, Westseite (Gde. Regensberg, 673 900/258 600), Waldrand Breitle bei Otelfingen (Gde. Otelfingen, 671 950/257 650, ca. 5 Stöcke auf etwa 4 m Waldrandlänge), Waldwegrand nordöstlich Grimmrüti (Gde. Boppelsen, 673 500/258 900, ca. 4 Exemplare auf 5 m Länge), SW-Waldrand des Gmeumeriwaldes (Gde. Würenlos, 668 900/256 300, hinter den beiden Häusern), Häfelerhau (Gde. Obersiggenthal, 665 200/260 255, von etwa dieser Stelle bereits Zehnder: Waldrand Häfelerhau, 27. 5. 43), Waldstrassenbord, ca. 15 vegetative Stöcke auf ca. 20 m, Pfeiferholz, Greppengebiet (Gde. Otelfingen, Wettingen, von dieser Stelle bereits Ulbrich: Pfeiferholz, 14. 6. 47), Weg zwischen Hochwald und Jungwuchs, 670 500/258 200, ca. 25 Exemplare. Individuenreichster Bestand: Kreuzlibergkuppe, 665 000/257 600, Gde. Baden, zahlreiche kräftige Exemplare auf ca. 200 x 20 m, zusammen mit *Sarothamnus scoparius*. Zudem Weber: Haselbuck, 13. 5. 34. Kölliker: «Lägern». WS: Nr. 791.

Genista tinctoria (Färber-Ginster)

Rikli (Karte für alle 3 Ginsterarten): U. a. nach Süden exponierte Waldränder (vgl. Kap. 3.3). Heute: Boppelser Weid (Gde. Boppelsen, Buchs, von hier ebenfalls Ulbrich: 3. 7. 54), Waldrand Kännelwiese, Bannholz (Gde. Wettingen, 669 080/258 900), Kalberweid (Geissberggebiet), Waldrand mit Pferdeweide (Gde. Oberehrendingen, Freienwil, 667 180/260 100, ca. 20 Stöcke auf etwa 30 m Länge; von Weber möglicherweise am gleichen Ort belegt: Haselbuck, ohne Jahr), Pfeiferholz, Greppengebiet (Gde. Wettingen, 670 500/258 200), Weg zwischen Hoch-

wald und Jungwuchs, nur 1 Exemplar; von Ulbrich ebenfalls von hier: Pfeiferholz, 14. 6. 47, 14. 7. 51. Ich fand diese Art früher auch am Limmatuferwaldrand (ungefähr von hier auch Mühlberg) unterhalb Schürli (Gde. Wettingen). Im Häfelerhau, wo sie Zehnder am 27. 5. 43 gefunden hat, habe ich keine mehr gefunden. WS: Nr. 789.

Geranium palustre (Sumpf-Storchschnabel)

Nach Rikli im Furttal «eine seltenere Erscheinung» (l.c. S. 11). Zehnder: an der Strasse zwischen Wettingen und Otelfingen bei Pt. 433 (Gchütt), 24. 7. 57; Ehrendingen, Kalberweid, 21. 8. 36. An diesen beiden Stellen kommt die Art heute noch vor. Gde. Wettingen, Würenlos, Oberehrendingen, Freienwil. Weitere FO: Gipsbach und am Waldrand nördlich Gipsgrube, am Schwarzenbach beim Aggenbühl, am Steinbuck und auf dem Geissberg. WS: Nr. 938.

Hypericum pulchrum (Schönes Johanniskraut)

Rikli: «Bergwald längs dem Baderweg ...» (l.c. S. 17). Hier kommt sie heute noch vor (Gde. Regensberg) und zudem bei der Spaltenfluh, ausserhalb des eigentlichen Lägerngebietes (Gde. Niederweningen). Dies sind meines Wissens die zwei einzigen heutigen Fundstellen. (Mühlberg: Martinsberg; Weber: Greppen, Wettingen, 24. 8. 38). WS: Nr. 1032.

Iris germanica (Deutsche Schwertlilie)

Rikli: «...in den Reben beim Fährlehn ob Wettingen...» (l.c. S. 55). Heute kommt diese Art immer noch an dieser Stelle vor: an Rebmauern, nordwestlich vom Fährli-Leh, Gde. Wettingen. Obwohl es sich hierbei um eine nicht selten angepflanzte Gartenpflanze handelt, scheint mir dieses Vorkommen, das von einer liebenswürdigen Rebenkultur vor nahezu 100 Jahren (und wahrscheinlich noch viel mehr) zeugt, beachtenswert. WS: Nr. 2129, fehlt 402.

Lactuca perennis (Blauer Lattich)

Angaben über die blaue Blume des Lägerngebietes gehen bis auf Kölliker («auf den Lägern») und Mühlberg («...der ganzen Höhe entlang») zurück. Weiter bei Rikli: Felsfluren; Weber (1935); Zehnder (1942). Ich habe den Eindruck, dass die Art durch den vordringenden Wald zurückgedrängt und bedroht wird (vgl. Kap. 5.1 und 6.3). Gde. Baden, Wettingen, Otelfingen, Boppelsen, Schleinikon, Niederweningen, Ober- und Unterehrendingen, Ennetbaden. WS: Nr. 1942.

Lilium bulbiferum ssp. croceum (Feuerlilie)

Rikli (Karte): *(L. croceum)* Felsfluren, Pfeifenrütifluh (hier auch Ulbrich, 17. 5. 53, 6. 6. 56), Burghorn (Ulbrich: 4. 5. 46, 24. 5. 47), Lägerngrat oberhalb Bussberg. Heute: Trockenhang oberhalb Bussberg, beim Drahtseil, Grat 200 m westlich des Bussbergaufstiegs, Grat, ca. 200 m östlich der Drahtseilstelle, am Fuss der Felsflur westlich des Wettingerhorns, Heerebüngertfelsen, westlich des Taglochs. Fast so etwas wie ein Wahrzeichen für die Lägernflora. Gde. Wettingen tangiert Niederweningen, Unterehrendingen, Oberehrendingen, Ennetbaden. WS: Nr. 2083, selten in 402.

Ornithogalum nutans (Nickender Milchstern)

Rikli: «In den Wiesen um den Steinhof bei Otelfingen tritt die Pflanze mass- haft auf ...mit den berühmten Narzissenwiesen der Westschweiz vergleichbar» (S. 18). Heute noch an dieser Stelle, dem einzigen FO im Lägerngebiet, wenn

nicht mehr mit der damaligen Üppigkeit, aber immer noch in einigen hundert Exemplaren. Beim Bewirtschaften der Wiese auf diese Art achten! (Vgl. Kap. 6.3). Gde. Otelfingen, 671 400/256 800. Auch von Ulbrich angegeben: 25. 4. 48. WS: Nr. 2086, fehlt 402, recht selten in der Schweiz, vielerorts verschwunden.

Pinguicula vulgaris (Gemeines Fettblatt)

Rikli: Boppelser Bergwiesen, zudem im Furttal. Weber: Otelfinger Ried, 29. 5. 35 (Standort existiert nicht mehr). Ulbrich: Boppelser Weid, 30. 5. 46 bis 56. Ich fand die Art noch 1959/60 im Sumpf Aggenbühl, beim Merzenacher im Greppengebiet. Wichtigster und wahrscheinlich einziger Fundort heute: Boppelser Weid, unterster Teil, gerade oberhalb des Wäldchens, auf etwa einer halben Are ziemlich häufig, d. h. alle 10–30 cm ein Stock. Gde. Boppelsen.

Pyrola rotundifolia (Rundblättriges Wintergrün)

Rikli: In lichten Föhrengehölzen. Weber: Boppelsen (wohl Boppelser Weid), 31. 5. 34. Ulbrich: Greppengebiet, am Weg nach Otelfingen, am Abhang des Aggenbühls, 26. 6. 55, 6. 6. 56; Sattel, ca. 100 m westlich der Einmündung des Weges von Ennetbaden, 2. 4. 49; zwischen Hochwacht und Regensberg, Gratnähe bzw. Waldrand, 1947 bis 56. Hier ist diese Art noch als *der einzigen Stelle im Lägerngebiet* zu finden: Waldrand/Wegrand zwischen Hochwacht und Regensberg, 15 m unterhalb der Stelle, wo die Strasse über die Wiese führt. Gde. Regensberg 674 600/259 460. Es ist dies meines Wissens der *letzte Fundort der ganzen Gattung* im Lägerngebiet! WS: Nr. 1209.

Quercus pubescens (Flaum-Eiche)

Rikli (Karte): *(Q. lanuginosa)* «...gehört ... nur der westlichen Lägern an...» (l.c. S. 36), zudem «spärlich am Steinbuck» (l.c. S. 47). Mühlberg: «...in der Scharte bei Baden (Jäggi)». Weber: Lägern, 5. 5. 35, «wohl verbastardiert». Zehnder: Lägerngrat, 17. 5. 44. Lüscher gibt mehrere Bastarde an. Heute noch recht häufig auf dem Westgrat. Gde. Wettingen, Oberehrendingen. WS: Nr. 144.

Rhododendron ferrugineum (Rostblättrige Alpenrose)

Rikli: Grenzpflanze für Lägerngebiet, Rütenenwald (heute Chüeboden, bei 600 m, 668 760/264 900) nördlich Schneisingen, etwa 1 Are. Von hier bereits Mühlberg. Gde. Schneisingen. Anlass für das Alpenrosenfest! WS: Nr. 1219, fehlt 402, selten in 404.

Ribes alpinum (Alpen-Johannisbeere)

Rikli (Karte): «...wenig westlich von Burgruine Alt-Lägern» und «6 Exemplare über der Pfeifenrütifluh» (l.c. S. 68). Hier und in der Nähe kommt sie heute noch vor: Ruinenkrete, Grat westlich Ballonwegmündung. Kölliker: «Auf der Lägern, ...dem Jurakalke eigen»). Gde. Boppelsen, Schleinikon, Otelfingen. WS: Nr. 667.

Rosa pendulina (Alpen-Hagrose)

Rikli: *(R. alpina)* «Grat ob Bussberg, reichlich an felsig-buschigen Stellen der Nordseite; östlich vom Burghorn, unweit der Kantonsgrenze» (l.c. S. 62, 68). An letzterer Stelle soll auch der Bastard *R. pendulina x R. spinosissima = R. rubella* vorkommen. Auf dem Grat und dessen Nordseite, ca. zwischen 30–70 m östlich der Mündung des Weges vom Bussberg zum Grat, zudem östlich der Drahtseilstelle, kommt diese Art, *einzig hier, heute noch* vor. Gde. Wettingen, Ennetbaden. WS: Nr. 679.

Rosa spinosissima (Reichstachlige Rose)
Rikli: *(R. pimpinellifolia)* Oberer Bergwald, Felsfluren, westlich Ruine, Burghorn, Innerer Gugel (= Wettingerhorn), Schartenfels. Bastard *R. pendulina x R. spinosissima = R. rubella* bei der Kantonsgrenze. Weber: Lägerngrat, 20. 6. 35. Heute noch auf dem Grat fast überall und häufig. Gde. Baden, Wettingen, Otelfingen, Boppelsen, Schleinikon, Niederweningen, Unter- und Oberehrendingen, Ennetbaden. WS: Nr. 676.
Rumex scutatus (Schildblättriger Ampfer)
Rikli (Karte): «...einzig Westende der Lägern ob Baden ... vermutlich nur als Kulturflüchtling» (l.c. S. 62). Bereits bei Mühlberg: «...an der Lägern bei Baden». An *genau dieser Stelle und nur hier* – Fels oberhalb Landvogteischloss – konnte sich diese durch ihre blaugrüne Färbung auffallende Art bis heute halten. Gde. Baden, Ennetbaden. Weber: Schadenmühle-Areal, 13. 8. 36. WS: Nr. 184, selten für 402.
Scilla bifolia (Zweiblättrige Meerzwiebel, Blaustern)
Die Art – auf der Lägern selber nicht vorkommend – fehlt bei Rikli, wird aber von Mühlberg vom «Hundsbuck bei Baden» angegeben. Hier wächst sie, vor allem auf der Westseite, *heute noch,* auf der Fläche von etwa 20 Aren, geradezu dicht. Gde. Baden. WS: Nr. 2087.
Sedum hispanicum (Spanischer Mauerpfeffer)
Die Art fehlt bei Rikli; ob sie damals noch nicht vorgekommen ist? Die Angabe in Hegis Flora (G. Hegi, 1906–36, Bd. IV 2, 1. Aufl., S. 529; «verwildert in Otelfingen», fehlt in der 2. Aufl., obwohl sie heute noch vorkommt: Radweg bei Otelfingen (Gde. Otelfingen). Weber fand die Art beim Bahnhof Baden, 20. 10. 40. WS: Nr. 633, fehlt 402 und 403.
Senecio silvaticus (Wald-Kreuzkraut)
Zehnder: Waldlichtung südlich der Spaltenfluh, 2 km nördlich Niederweningen, 31. 7. 61, also etwas ausserhalb des engeren Lägerngebietes. An genau dieser Stelle noch vorhanden. Gde. Niederweningen. Zudem im Wiberhau, Buchserberg, Gde. Dielsdorf, Regensberg. Weber: BBC-Areal Bruggerstrasse, 12. 8. 34. Kölliker: «Lägern». WS: Nr. 1850, fehlt in 402, aber in 404 vorhanden.
Sesleria coerulea var. albicans (Blaugras-Varietät mit gelbgrünen Ährchen)
Rikli: «...bei der Burgruine Hoch-Lägern ... *O. Heer* sammelte am 25. IV. 1836: *Sesleria coerulea v. flavescens* offenbar die gleiche Pflanze auch schon am gleichen Standort...». Und hier, an der Nordböschung der nordwestlichen Felsenkrete, an der höchsten Stelle der Lägern somit, kommt diese Varietät, *in nurmehr etwa 4 Stöcken, heute noch vor.* Gde. Schleinikon, Boppelsen. WS: Nr. 2238.
Sorbus mougeotii (inkl. Bastarde; Mougeots Mehlbeerbaum)
Rikli nennt verschiedene Sorbus-Bastarde, so z. B. *S. decipiens (= S. aria x torminalis):* «Ich kenne ihn von der Greppe in drei stattlichen Bäumchen, die alljährlich blühen und auch zu fruktifizieren scheinen» und *S. aria x mougeotii:* «von der Greppe und vom Kellenholz» (l.c. S. 15). Ich fand auf der Greppe (669 695/257 360, Gde. Wettingen) 2 interessante Sorbus-Bäume, welche ich als *S. mougeotii* angesprochen hätte, die aber möglicherweise Riklis Bastarde darstellen. *S. mougeotii* fand ich am Waldrand östlich Boppelsen (Gde. Boppelsen) und

auf dem Lägerngrat, 200 m westlich des Bussbergaufstiegs, direkt neben *S. aria* (Gde. Wettingen, Ennetbaden). Lüscher betrachtet Riklis Bastarde als sehr zweifelhaft. WS: Nr. 764, fehlt 402.

Thesium alpinum (Gemeiner Bergflachs)

Rikli fand diese Art «...beim Burghorn spärlich» (l.c. S. 67). Es ist möglicherweise dieselbe Population, die heute noch *an dieser für das ganze Lägerngebiet einzigen Stelle* vorkommt! Sie befindet sich etwa 15 Meter östlich der Bänklein, auf einem Felskopf, flächenmässig kaum mehr als 3 Quadratmeter bedeckend. Gde. Wettingen, Niederweningen, Unterehrendingen. WS: Nr. 156.

Valeriana montana (Berg-Baldrian)

Rikli (Karte): «...an buschiger Stelle unweit der Kantonsgrenze...» (l.c. S. 34). Diese Art ist auch heute noch an dieser Stelle zu finden! Sind es noch die gleichen Populationen? Gde. Wettingen, Niederweningen, Unterehrendingen. Weitere FO: Burghorn, Nord- und Westseite. Im weiteren vereinzelt auf dem Westgrat. WS: Nr. 1664.

Vicia dumetorum (Hecken-Wicke) und

Vicia silvatica (Wald-Wicke)

Beide von Rikli vom «Nordabhang, beim Abstieg zu den Gipsgruben» (l.c. S. 44) angegeben, wo beide da und dort im Lägerngebiet zu findenden Arten heute noch vorkommen. Beide bereits bei Kölliker. Gde. Unterehrendingen. WS: Nr. 825 und 823.

5 Die jüngste Geschichte der Lägernflora – Bilanz und Deutungsversuche

Die folgenden Unterkapitel samt Artenlisten beziehen sich auf das ganze Lägerngebiet. Allfällige Angaben in den Werken aus dem letzten Jahrhundert (Kö = A. Kölliker, 1839, Mü = F. Mühlberg, 1880) werden in den Kap. 5.1, 5.2 und 5.3, diejenigen in Lüschers Flora (Lü = H. Lüscher, 1918) nur in den Kap. 5.2 und 5.3, *ergänzend* mitberücksichtigt (vgl. Kap. 2). FO = Fundort(e). Wpfl. = Wasserpflanze im engeren oder weiteren Sinne (Kap. 3.1).

5.1 Verschwundene Arten

Insgesamt 74 Arten, die wohl verschwunden sind. Nur Ri = 42 Arten, die ausschliesslich von Rikli angegeben werden, z.T. mit Angaben aus seiner Arbeit (M. Rikli, 1907). Verschw. = 32 Arten, die ausser oder an Stelle von Rikli noch von anderen Autoren/Sammlern (vgl. Kap. 2), aber nicht mehr in den neueren Arbeiten angegeben werden, also weder bei Cuny (R. Cuny, 1983), noch im Verbreitungsatlas (M. Welten, R. Sutter, 1982), noch bei mir zu finden sind; die Liste ist somit restriktiv gehalten. U = «Unkraut», Arten der Hackunkraut-, Ruderal- und Getreideunkrautgesellschaften (Pfl.ges. 3.3 und 3.4 nach H. Ellenberg, 1979). Nicht aufgenommen habe ich *Arabis ciliata* (die vom bezüglich Fundortsangaben unzuverlässigen Rohrer auf dem Lägernkamm gefunden worden sein soll), *Rosa sabini* (die nicht sicher zu identifizieren ist) und alle ausgesprochenen Kulturpflanzen, die kaum verwildern.

Aceras anthropophorum: Ende 1870er Jahre ... Westende der Lägern. Nur Ri. *Agrostemma githago:* Unkraut in Getreide. U. Verschw. *Alchemilla arvensis:* Bhf. Otelfingen. U. Verschw. *Alnus viridis (A. alnobetula):* Waldrand bei Bietschären, nördlich vom Kempfhof bei Würenlos, NO-Seite des Kellenholzes, N-Seite des Schwenkelberges, massenhaft, Waldwiese zwischen Regensberg und Hochwacht. Nur Ri. (Mü: bei Schneisingen). *Amaranthus lividus var. ascendens:* Regensberg. U. Verschw. (nach E. Landolt, mdl., in ZH hfg.). *Anthericum liliago:* Felsfluren. Verschw. (Mü). *Anthriscus cerefolium:* nur Ri. *Arctostaphylos uva-ursi:* östlich Bückeli. Nur Ri. *Ballota nigra:* Schöfflisdorf, Regensberg, Boppelsen, Otelfingen. Nur Ri. (Kö). *Bidens tripartita:* Alte Rütenen bei Wettingen. Unkraut in Getreide. Wpfl. Verschw. *Blysmus compressus:* Furttal, auf Sumpf-Fusswegen. Nur Ri. *Botrychium lunaria:* Malzhalde. Nur Ri. *Bromus arvensis:* unterer Bhf. Buchs. U. Nur Ri. *Bromus secalinus:* Unkraut in Getreide, Neubrunnen bei Sünikon. U. Verschw. *Carex ericetorum:* Bösbuck bei Adlikon, Buchserberg. Nur Ri. *Carex pulicaris:* Furttal. Nur Ri. *Carex rostrata:* Furttal. Wpfl. Nur Ri. *Carex vesicaria:* Furttal. Wpfl. Verschw. *Cerastium brachypetalum:* Verschw. *Chenopodium hybridum:* Regensberg. U. Verschw. (Kö). *Chrysanthemum parthenium:* Baden, in Bauerngärten. Nur Ri. (Mü). *Coeloglossum viride:* Mühlberg: N-Seite der Lägern; vgl. Kap. 3.6. Verschw. (Kö). *Crepis foetida:* Verschw. (Mü). *Crepis praemorsa:* Greppe. Nur Ri. (Mü). *Dianthus carthusianorum:* Antilägern, Geissberg. Nur Ri. *Dianthus superbus:* «Riese» am Baderweg. Nur Ri. *Dipsacus silvester:* Verschw. *Erucastrum nasturtiifolium:* Bhf. Niederweningen. Verschw. *Euphorbia exigua:* unterer Bhf. Buchs. U. Verschw. *Euphrasia odontites:* unterer Bhf. Buchs, Unkraut in Getreide. Nur Ri. *Fragaria viridis:* oberer Bergwald. Verschw. (Mü). *Galium boreale:* Furttal. Nur Ri. *Gentiana cruciata:* Boppelser Bergwiesen, Greppe. Verschw. *Gentiana germanica:* Boppelser Bergwiesen. Verschw. *Gentiana utriculosa:* Boppelser Bergwiesen. Nur Ri. *Gentiana verna:* Heidelöcher westlich Buchs, Moos ob Nassenwil. Nur Ri. *Holosteum umbellatum:* Bhf. Otelfingen. Nur Ri. *Hydrocotyle vulgaris:* Furttal, Hochmoorstellen. Wpfl. Nur Ri. *Jasione montana:* Pfaffenbühl und Herrenbaumgarten ob Wettingen. Nur Ri. (Kö). *Lathyrus heterophyllus:* Fuss der Pfeifenrütifluh. Verschw. (Mü). *Lathyrus tuberosus:* Fuss der Pfeifenrütifluh, am Wegrand. U. Nur Ri. *Lepidium campestre:* Unkraut in Reben. Verschw. *Lepidium ruderale:* Bhf. Niederweningen, Bhf. Dielsdorf. Verschw. *Linum usitatissimum:* «fast bei jedem Dorf angepflanzt». Verschw. *Lithospermum arvense:* Unkraut in Getreide. U. Nur Ri. *Lithospermum offcinale:* Unkraut in Getreide. Nur Ri. *Lycium halimifolium:* Ennetbaden. Gartenflüchtling? Nur Ri. *Melampyrum arvense:* Unkraut in Getreide. U. Verschw. *Minuartia hybrida:* Bhf. Otelfingen, Bhf. Niederweningen. Verschw. (Kö, Mü). *Pedicularis palustris:* Furttal. Nur Ri. *Peucedanum palustre:* Furttal. Verschw. *Poa palustris:* Furttal. Verschw. *Potamogeton densus:* Furttal. Wpfl. Verschw. *Potamogeton pectinatus:* Furttal. Wpfl. Verschw. *Potentilla argentea:* Regensberg, Ruine Mandach. Nur Ri. *Pulsatilla vulgaris:* ob dem Burghof bei Regensberg. Nur Ri. (Mü). *Pyrus nivalis:* Bolli (Greppe), ob Herrengut, östlich Bückeli. Nur Ri. (Nach Lü: *P. communis var. pyraster). Ranunculus circinatus:* Furttal. Wpfl. Nur Ri. *Rhinanthus angustifolius:* Furttal. Nur Ri. *Rorippa islandica:* Furttal. Verschw. (Mü). *Rosa jundzillii:* nur Ri. *Rosa vosagiaca:* oberer Bergwald, Grat. Nur Ri. *Salix repens:* Furttal, Hochmoorstellen. Nur Ri. *Salvia verticillata:* nördlich Würenlos. Gipsgrube. Gartenflüchtling? Verschw. *Saxifraga rotundifolia:* Kellenholz. Nur Ri. *Scandix pecten-veneris:* Otelfingen, ob Buchs, Unkraut in Getreide. U. Nur Ri. *Senecio paludosus:* Furttal. Nur Ri. *Setaria verticillata:* Regensberg. U. Nur Ri. (Mü). *Thesium rostratum:* Greppe. Verschw. (Mü). *Tulipa gesneriana:* Sonnenrain bei Otelfingen, in den Reben. Wohl angepflanzt. Nur Ri. *Ulmus levis:* Längs dem Grat gegen Baden. Nur Ri. (Mü). *Utricularia minor:* Furttal, Hochmoorstellen. Wpfl. Nur Ri. *Vicia pannonica:* Weber: Zementfabrik Gipsgrube, 17. 5. 34. Verschw. *Vulpia myuros:* unterer Bhf. Buchs, Otelfingen. U. Verschw.

5.2 Neue Arten

Insgesamt 51 Arten, die hier samt FO erstmals und ausschliesslich von mir (allenfalls noch von Kölliker, Mühlberg, Lüscher) für das Lägerngebiet angegeben

werden. Für die Arten, die bereits in den nicht publizierten Quellen (J. Weber, A. Zehnder: Herbarangaben, E. und J. Ulbrich: Exkursionsnotizen, vgl. Kap. 2) zu finden sind, somit *relative* Neufundangaben darstellen, muss das Kap. 3 konsultiert werden. Die unterstrichenen Arten dürften sich in naher Zukunft wohl weiter ausbreiten (vgl. Kap. 5.5). Bei *Cotoneaster divaricata, C. horizontalis, Mahonia aquifolium* (noch bei Cuny), *Polygonum cuspidatum (Reynoutria japonica*, noch im Welten-Sutter-Atlas) und *Prunus laurocerasus* handelt es sich wohl um Gartenflüchtlinge; sie sind vollständig eingebürgert.

Acorus calamus: Böndlerweiher nordwestlich Nuechtal. Wpfl. *Anthemis tinctoria:* Bernau. *Arabis arenosa:* Waldwegrand unterhalb Hochwacht. *Carex gracilis:* Am mittleren Grimmrütiweiher, nordöstlich Boppelsen. Wpfl. *Carex riparia:* Bachbord Hulligen, nördlich Otelfingen.Wpfl. *Cerastium tomentosum:* (Lü: Stein zu Baden; heute noch!). Rebmauer Nähe Fährli-Leh. *Ceratophyllum demersum:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Ceratophyllum submersum:* Häfelerhaufolienweiher, Weiher bei Sünikon. Wpfl. *Ceterach officinarum:* (Lü: Baden?). Mauer bei Regensberg. *Comarum palustre:* Gartenweiher, eingepflanzt. *Corydalis lutea:* (Mü: beim Gasthof zum Bären in Baden). Mauer in Ennetbaden und Otelfingen. *Cotoneaster divaricata:* Felsfluren westlich Schartenfels, Häfelerhau, Heerebüngertfelsen. *Cotoneaster horizontalis:* Pfeiferrütifluh, Gipsgrubengebiet. *Cyclamen neapolitanum:* Abkürzung im Chrummorge, Dickeren; wohl angepflanzt. *Deschampsia flexuosa:* Baderweggebiet, Häfelerhau, Spaltenfluh. *Dianthus barbatus:* Geissberggebiet. *Dianthus deltoides:* Bernau. *Elodea nuttallii:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Epilobium roseum:* Brand, Regensberggebiet. *Equisetum silvaticum:* im Pfeiferholz, Greppengebiet. *Helleborus viridis:* Steilhang zur Limmat, bei Kantonsschule Wettingen. *Hepatica nobilis:* (Mü: Teufelskeller). Bösbuckwäldchen bei Adlikon. *Hieracium aurantiacum s.l.:* Tägerhard, Strassenbord. *Hieracium auricula:* (Kö: Lägern). Sulzbergsüdseite, Kalberweid. *Hippophaë rhamnoides:* (Lü: an der Limmat). Strassenbord zwischen Schöfflisdorf und Sünikon. *Hyacinthoides hispanica:* ein paar Stöcke 50 m südlich Burghorn, wohl eingepflanzt. *Hydrocharis morsus-ranae:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Impatiens glandulifera:* Wegrand Kellenholz. *Lagarosiphon major:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Lathyrus latifolius:* (Kö: Kalkfelsen der Lägern ob Otelfingen). Waldstrasse im Chrummorge, Dickeren, unbeständig. *Lemna trisulca:* (Mü und Lü: Stadtteich Baden). Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Lysimachia thyrsiflora:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Melilotus indica:* Natursträsschen in Wettingen (unbeständig). *Nymphoides orbiculata:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Oenothera muricata:* Alte Otelfingerstrasse, Limmatufer Würenloser Bucht (bereits 1960). *Petasites hybridus:* Dättwiler Weiher. *Phleum cf alpinum:* beim Steinhof, nördlich des Burghorns. *Populus alba:* Böndlerweiher nordwestlich Nuechtal. *Prunus laurocerasus:* Wald beim Bösbuck, oberes Nuechtal, Weiher alte Bahn Buchs. *Ranunculus lanuginosus:* (Lü: Martins- und Geissberg, Wälder ob Wettingen). Waldstrasse Chrummorge, Dickeren, Greppengebiet. *Ranunculus sceleratus:* (Lü: um Baden). Steinbuckweiher. Wpfl. *Rorippa amphibia:* Limmatufer Wettingen, beim Fischerhäuschen. Wpfl. *Sagittaria latifolia:* Muntelweiher, oberhalb Hütte. Wpfl. *Sagittaria sagittifolia:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Salix cf daphnoides:* Böndlerweiher nordwestlich Nuechtal, wohl angepflanzt. *Scrophularia alata:* Zindelen, Schwarzenbach, Hochwachtgebiet. *Sparganium minimum:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Spirodela polyrrhiza:* Böndlerweiher nordwestlich Nuechtal, Gartenweiher. Wpfl. *Stratiotes aloides:* Gartenweiher, eingepflanzt. Wpfl. *Typha angustifolia:* (Mü: Stadtteich Baden). Gartenweiher, eingepflanzt; Böndlerweiher nordwestlich Nuechtal. Wpfl. *Verbascum phlomoides:* Strassenrand Wettingen.

5.3 Arten, die nur von einem Autor/Sammler angegeben werden

Arten, die in den benützten Hauptquellen (vgl. Kap. 2) jeweils ausschliesslich angegeben werden, sollen hier mitgeteilt und z.T. kritisch beleuchtet werden.

Überall sind ausgesprochene Garten-, Nutz- und Kulturpflanzen nicht berücksichtigt. (Nur-Rikli-Arten: Kap. 5.1, eigene Neufunde: Kap. 5.2).

5.31 Arten, die nur von J. Weber gefunden wurden (57 Arten, einschliesslich Dättwiler- und Freienwilergebiet)

DW = leg. Doris Weber. Es kann sein, dass die Zahlen 4 und 6 in Webers Handschrift von mir gelegentlich verwechselt wurden.

Achillea ptarmica: Dättwiler Weiher, feuchte Wiese (DW), Stadtweiher, 5. 8. 35 (Mü, Lü). *Agrostis canina:* Kleines Moor ob Lengnau, 15. 6. 47. *Amaranthus albus:* Rieden, am Weg Meerhalden, 30. 10. 43. Bhf. Baden, 43. *Amaranthus hybridus:* Acker an Schwimmbadstrasse, Wettingen, 17. 6. 47. *Aster novae-angliae:* Limmatufer bei Wettingen, 7. 43. *Atriplex hastata:* Schutthaufen Wettingen, 1. 8. 48. *Avena orientalis:* Schönaustrasse, Getreideacker, 7. 7. 40. *Brassica juncea:* Oberehrendingen, neben Geflügelfarm, 9. 9. 39. *Bromus commutatus: (B. pratensis)* Rebbergstrasse bei Baden, 20. 6. 41. *Bunias orientalis:* eingedeckter Kanal, Wettingen, Kloster, 19. 6. 35. *Camelina sativa:* Wettingen, Kloster, Limmat-Aufschüttung, 5. 6. 35 (Lü). *Carduus crispus:* Eigi Wettingen, 31. 10. 34. *Carex distans (inkl. var. virescens):* Tobel, Siggenthal, 30. 5. 38, 27. 5. 36. *Carex vulpina:* Otelfinger Ried, 15. 8. 38 (Lü). *Chenopodium botrys:* Bahnhofareal südlich Wettingen, 9. 8. 36. *Cotoneaster tomentosa:* Boppelsen, 31. 5. 34 (Mü). *Cynosurus echinatus:* Strassenrand Wettingen–Otelfingen, 20. 6. 37. Bahnhof Baden, ohne Jahr. *Epilobium palustre:* Kappelerhof, 17. 8. 35. *Erysimum repandum:* Stadtweiher, 11.7.36. *Euphorbia lathyris:* Lägern-Nordhang, 20.11.46 (Mü, Lü). *Euphorbia maculata:* Rieden, Obersiggenthal, 3. 11. 43. *Euphorbia nutans:* Bahnhof Baden, 15. 9. 43. (*Fraxinus ornus:* Bahnhof Dättwil, 20. 5. 43, eigentlich ausserhalb des Gebietes). *Fumaria vaillantii:* Friedhof Baden, 26. 5. 40. *Herniaria glabra:* Baden, BBC-Areal, 4. 8. 35. *Holcus mollis:* Hohlweg Kirchdorf–Tromsberg, 12. 5. 35. *Hypericum desetangsii:* Kirchdorf, Siggenthal, 15. 9. 38. *Lathyrus aphaca:* Limmatufer Rieden, 10. 6. 39 (Mü, Lü). *Leucojum aestivum:* Unterehrendingen, 20. 5. 37. *Lithospermum purpuro-coeruleum:* Lägern-Südhang, oberhalb Sonnenblick, 26. 5. 36 (Lü). *Mentha spicata:* Baden, Gartenflüchtling? 16. 8. 35. *Neslia paniculata: (Vogelia paniculata):* Bahnhof Baden, 1943. *Papaver argemone:* Baden, Bahnhof, 25. 6. 42 (Kö, Mü, Lü). *Papaver somniferum:* Kurpark Baden in Haferfeld, 15. 6. 43. Würenlos, Wiesenrand, 20. 7. 38. (DW). *Picris echioides.* Anlage beim Schwimmbad, 29. 8. 35. *Polycnemum majus.* Baden, Bahnhof, 2. 7. 39. *Polygonum hydropiper:* Stadtweiher, 15. 8. 37. *Potamogeton crispus:* Stausee Wettingen, 12. 8. 35. *Potamogeton lucens:* Stadtweiher, 27. 5. 34. *Potentilla arenaria:* Lägern bei Baden, einziger Standort in der Schweiz, 7. 5. 50. *Rapistrum rugosum:* Bahnhof Baden, 20. 6. 43. *Rosa abietina:* Lägern, 20. 6. 35. *Rosa eglanteria:* Lägern, 20. 6. 35 (Mü, Lü). *Rumex conglomeratus:* Stausee Wettingen, 10. 8. 35 (Lü). *Salix babylonica:* Gärtnerei Siggenthal, 30. 4. 34. *Scleranthus annuus:* Schneisingen, 21. 10. 34. *Scrophularia canina:* Wettingen, Bahnhofareal, 15. 6. 36 (Lü). *Senecio viscosus:* BBC-Areal Bruggerstrasse, 12. 9. 34, 16. 8. 37. (DW). *Sisymbrium altissimum:* Bahnhof Baden, 1943. *(Spergula arvensis:* Freienwil, 27. 7. 35, eigentlich ausserhalb des Gebietes). *Stachys germanica:* Kreuzliberg in Waldlichtung, mächtige Exemplare, 8.57 (Lü). *Torilis arvensis:* Lägern, Schartenrain, 13. 7. 35. *Trichophorum caespitosum:* Tobelried, Siggenthal, Juni 36. *Vaccaria pyramidata:* Wettingen, Gartenunkraut, 16. 6. 48. *Veronica agrestis:* Siggenthal, Getreideacker, 15. 5. 42. *Veronica polita:* Ehrendingerstrasse, 10. 5. 35. *Vicia villosa:* Siggenthal, Getreideacker, 17. 6. 46 (Mü, Lü).

5.32 Arten, die nur von A. Zehnder gefunden wurden (8 Arten)

Allium carinatum: Wiese des Kleinkaliberschiessstandes beim Schlachthaus, 26. 8. 65 (Lü). *Artemisia biennis:* (leg. AZ, det. Landolt ETH) Neuenhof, 666 675/256 450; eingeschleppt aus British Columbia, in einem Runkelrübenacker neben der Bahnlinie, 28. 9. 60. *Epilobium obscurum:* Wettingen, in

einem feuchten Strassengraben unterhalb des Seminars, bei der Holzbrücke, 13. 7. 57. *Eriophorum angustifolium:* Nussbaumen, oberhalb Kämpfwiese, Nuechtal, 27. 5. 43. *Lathyrus hirsutus:* Neuenhof, in einem Getreideacker am Stausee, 8. 7. 57. *Lolium cristatum:* Nussbaumen bei Baden, Wegrand in der Breite, 23. 6. 57, det. Hess, ETH. *Mentha piperita (= aq. x spic.):* Obersiggenthal, Hölle, 23. 9. 41. *Senecio vernalis:* Böschung der Bahnlinie, Neuenhof, 25. 5. 79, osteuropäisch-westasiatische Pflanze, die in neuerer Zeit nach Westen vordringt.

5.33 Arten, die nur von E. und J. Ulbrich angegeben werden (15 Arten)

Von Ulbrichs werden als einzige ausser *Orchis globosa* (Boppelser Weid, 30. 5. 46, auch Lü) und *Orobanche laserpitii-sileris* (zwischen Hochwacht und Regensberg, Gratnähe, Waldrand, 30. 5. 46) die folgenden Arten aus dem Lägerngebiet angegeben; es ist aber anzunehmen, dass es sich dabei um mögliche Falschbestimmungen oder um sehr unbeständige Einzelvorkommen handelt. (Herbarbelege und oft auch genaue FO-Angaben fehlen.)

Astrantia major (zwischen Hochwacht und Regensberg, 24. 5. 47), *Campanula scheuchzeri* (Ostlägern, 12. 10. 52), *Coronilla coronata* (Magerwiese östlich des Burghorns, 24. 5. 47), *Coronilla minima* (4. 6. 60), *Coronilla vaginalis* (10. 5. 58), *Draba tomentosa* (Lägerngrat zwischen Bussbergaufstieg und Burghorn, 26. 3. 48), *Epilobium alpestre* (30. 6. 60), *Lonicera caprifolium* (14. 5. 58) (Mü), *Poa alpina*, *Potentilla aurea* (30. 6. 60), *Sedum rupestre* (Lägerngrat bei der Hochwacht, 19. 7. 47) (Lü), *Thymus vulgaris* (Boppelser Weid, 3. 8. 55), *Viola canina* (21. 4. 59).

5.34 Arten, die nur von Cuny (R. Cuny, 1983) angegeben werden (8 Arten)

Die folgenden Arten müssten nachbestimmt werden, doch Herbarbelege und oft auch genaue FO-Angaben fehlen.

Aster salignus, *Bunium bulbocastanum:* Felsfluren westlich Schartenfels, *Cardamine heptaphylla* (die an der angegebenen Stelle vorhandene *Cardamine pentaphylla* fehlt bei Cuny), *Chrysosplenium oppositifolium* (*Chr. alternifolium* fehlt bei Cuny), *Inula helvetica*, *Onobrychis arenaria* (*O. viciifolia* fehlt bei Cuny), *Ranunculus polyanthemos*, *Trifolium strepens* (Lü).

5.35 Arten, die nur im Welten-Sutter-Atlas zu finden sind (16 Arten)

Ein * bedeutet, dass die Art mit einem vollen Punkt – der Signatur für «reichliches oder häufiges Vorkommen» (M. Welten, R. Sutter, 1982, Bd. 1, S. 88) – in der Kartierfläche 402 (Lägern) vertreten ist, was nach meinen Beobachtungen heute nicht mehr zutrifft oder doch irreführend ist. Die Zahl bedeutet die Nummer der Verbreitungskarte.

Artemisia verlotorum: 1809*. *Asarum europaeum:* 162* (Lü). *Carex humilis:* 2480, selten in 402. *Cuscuta epithymum:* 1320*, *Dryopteris thelypteris (Thelypteris palustris):* 38* (Lü). *Elymus europaeus:* 2276* (Kö, Mü, Lü). *Festuca altissima:* 2171* (Mü, Lü). *Lepidium perfoliatum:* 581*. *Lonicera nigra:* 1650* (Mü). *Orobanche teucrii:* 1579* (Mü, Lü). *Plantago intermedia:* 1634*. *Potamogeton nodosus:* 2033* (ob *P. natans*, Fliesswasserform? Vgl. Kap. 3.1). *Rumex thyrsiflorus:* 188*. *Salix triandra:* 98*. *Salvia glutinosa:* 1442*. *Stachys annua:* 1407*.

Auch die folgenden 23 z.T. nicht ausschliesslich im WS-Atlas angegebenen
n weisen einen fragwürdigen vollen Punkt auf, was die Seltenheit (wenn

überhaupt noch vorhanden) und den akuten Bedrohungsgrad einiger dieser Arten im Feld 402 verschleiert.

Cirsium acaulon (C. acaule), Coronilla emerus, Cytisus sagittalis, Genista tinctoria, Gentiana asclepiadea, Gladiolus paluster (G. palustris), Helleborus foetidus, Hypericum pulchrum, Legousia speculum-veneris, Mentha arvensis, Ophioglossum vulgatum, Phyllitis scolopendrium, Pinguicula vulgaris, Polygala chamaebuxus, Prunus padus, Pyrola rotundifolia, Pyrola (Orthilia) secunda, Ranunculus flammula, Scilla bifolia, Stachys palustris, Tetragonolobus maritimus, Thesium alpinum, Viscum album.

In analogem, wenn auch abgeschwächtem Sinne könnten hier noch weitere Arten angefügt werden, und es stellt sich die Frage, ob dies ebenfalls für andere Kartierflächen zutrifft; dann wäre der Gefährdungsgrad etlicher Arten wohl viel höher, als man auf Grund der Signatur aus den Verbreitungskarten zu schliessen geneigt ist (vgl. Kap. 6.3).

5.4 Seltene und zurückgegangene Arten (163 Arten)

Die folgende Zusammenstellung zeigt bemerkenswerte Arten, die im Lägerngebiet selten bis sehr selten (s) oder zurückgegangen (z) sind. Letztere brauchen (noch) nicht selten zu sein, auf Grund von Angaben in älteren Arbeiten, namentlich in Rikli, muss aber auf einen wahrscheinlichen bis sicheren Rückgang dieser Arten während der letzten Jahrzehnte geschlossen werden. Die unterstrichenen Arten sind nicht im Kap. 4 aufgeführt; ich betrachte sie ebenfalls als besonders erhaltenswert und zudem augenfällig genug, um auch Einzelvorkommen (von denen wichtige bei noch nicht erwähnten Arten hier angegeben werden) beachten zu können (vgl. Kap. 6.3).

Acorus calamus s., *Adenostyles cf alliariae* s. z., *Alisma plantago-aqatica* s. z., *Allium oleraceum* s. z., *Alopecurus pratensis* z., *Alyssum montanum* s., *Antennaria dioeca* s., *Anthericum ramosum* s. z., *Anthriscus silvestris* z., *Arabis arenosa* s., *Asplenium fontanum* s., *Bidens connata* s., *Blechnum spicant* s. (Waldstrassenbord Müllern, nordwestliche Greppe), *Briza media* z., *Bromus erectus* z., *Callitriche spec.* s. z., *Campanula cervicaria* s. z., *Campanula glomerata* s. z., *Cardamine pentaphyllos* s., *Carex alba* s. (Martinsberg, NO-Abhang, halbe Höhe), *Carex davalliana* s. z., *Carex flava s.l.* s. z. (Teufelsloch südlich Boppelser Weid), *Carex fusca* s., *Carex gracilis* s., *Carex halleriana* s. z., *Carex hostiana* s. z., *Carex leporina* s. z., *Carex ornithopoda* s., *Carex paniculata* s. z., *Carex pilulifera* s. (Obersiggenthal, Nordseite des Tobels), *Carex riparia* s., *Carex umbrosa* s., *Carlina acaulis* s., *Castanea sativa* s., *Ceratophyllum demersum* s. (angepflanzt), *Ceterach officinarum* s. (Mauer in Regensberg), *Chrysanthemum leucanthemum s.l.* z., *Cirsium acaulon* s., *Comarum palustre* s. (angepflanzt), *Cyclamen neapolitanum* s. (Abkürzung in Dickeren, angepflanzt?), *Cytisus sagittalis* s. z., *Daucus carota* z., *Dianthus armeria* s. z. (u. a. äusserer Sulzberg), *Dianthus barbatus* s. (Gartenflüchtling?), *Dianthus deltoides* s. (Gartenflüchtling?), *Digitalis cf lutea* s. z., *Digitalis purpurea* s. (Gartenflüchtling?), *Diplotaxis muralis* s. (Gartenflüchtling?), *Dryopteris disjuncta* s. (Kreuzliberg, oberhalb Baden-Oberstadt), *Dryopteris limbosperma* s., *Elodea nuttallii* s. (angepflanzt), *Epipactis atropurpurea* s., *Epipactis palustris* s. z., *Epipactis purpurata* s., *Equisetum fluviatile* s. z., *Eriophorum latifolium* s. z., *Erodium cicutarium* s., *Erysimum cheiranthoides* s. (unbeständig), *Festuca ovina* z., *Galium rotundifolium* s., *Galium verum* z., *Genista germanica* s. z., *Genista tinctoria* s. z., *Geranium molle* s., *Geranium pusillum* s. (Rebberg 400 m östlich Schartenfels), *Gladiolus paluster* s. (angepflanzt, vgl. Kap. 3.23), *Helleborus foetidus* s. (Bösbuckwäldchen Adlikon), *Helleborus viridis* s. (Gartenflüchtling?), *Hemerocallis fulva* s. (Walhalla, wohl angepflanzt), *Hepatica nobilis* s., *Heracleum sphondylium s.l.* z., *Herminium monorchis* s. z., *Hieracium aurantiacum s.l.* s. (Strassenbord Tägerhard, Gartenflüchtling?), *Himantoglossum hircinum* s., *Hippop*

rhamnoides s. (zwischen Schöfflisdorf und Sünikon, angepflanzt?), *Hydrocharis morsus-ranae* s. (angepflanzt), *Hypericum pulchrum* s., *Impatiens glandulifera* s., *Iris sibirica* s. (angepflanzt, vgl. Kap. 3.23), *Juncus alpinus* s. z., *Juncus articulatus* s. z., *Juncus bufonius* s. z., *Juncus conglomeratus* s. z. (u. a. Buchserberg), *Juniperus communis* s. z., *Knautia arvensis* z., *Lactuca perennis* z., *Lagarosiphon major* s. (angepflanzt), *Liparis loeselii* s., *Lychnis flos-cuculi* s. z., *Lysimachia thyrsiflora* s. (angepflanzt), *Malva neglecta* s. z., *Medicago falcata* s. (Hochwacht, bereits verschwunden?), *Melampyrum cristatum* s., *Mentha arvensis* s., *Mentha longifolia* s. z., *Menyanthes trifoliata* s. z., *Muscari comosum* s. z., *Nigella damascena* s. (äusserer Sulzberg, Gartenflüchtling?), *Nuphar lutea* s. (mittlerer Grimmrütiweiher, angepflanzt?), *Nymphoides orbiculata* s. (angepflanzt), *Ophioglossum vulgatum* s., *Ophrys apifera* s., *Ophrys insectifera* s. z., *Orchis militaris* s. z., *Orchis morio* s., *Orchis purpurea* s. z., *Orchis ustulata* s., *Ornithogalum nutans* s. z., *Ornithogalum umbellatum* z. (zerstreut auf Wiesen), *Papaver rhoeas* z., *Parnassia palustris* s. z., *Petasites hybridus* s., *Phalaris canariensis* s. (Gartenflüchtling?), *Phyteuma orbiculare* s., *Pinguicula vulgaris* s. z., *Polygonum amphibium* s., *Polystichum lonchitis* s., *Populus alba* s. (angepflanzt?), *Potamogeton coloratus* s. (angepflanzt), *Potamogeton natans* s., *Potamogeton pusillus s.l.* s., *Potentilla recta* s., *Prunus cerasus* s., *Pulmonaria officinalis* s., *Pyrola rotundifolia* s. z., *Pyrus malus* s. z., *Ranunculus arvensis* s. z. (Ackerrand Otelfingen), *Ranunculus lingua* s. (angepflanzt?), *Ranunculus sceleratus* s., *Ranunculus trichophyllus* s. (u. a. Furtbach bei Dänikon), *Rhinanthus alectorolophus* s. z., *Rhinanthus minor* s. z., *Rorippa amphibia* s., *Rosa dumetorum* s., *Rosa pendulina* s., *Rumex acetosella* s. z., *Rumex scutatus* s., *Sagittaria latifolia* s. (unbeständig), *Sagittaria sagittifolia* s. (beide angepflanzt), *Salix aurita* s. (angepflanzt?), *Salix daphnoides* s. (angepflanzt?), *Salvia pratensis* z., *Sarothamnus scoparius* s. z. (Kreuzlibergkuppe), *Saxifraga tridactylites* s. z. (auf Gleisschottern), *Schoenoplectus lacuster* s., *Schoenus ferrugineus* s. z., *Schoenus nigricans* s. z., *Selinum carvifolia* s. z., *Sium erectum* s. z., *Sparganium minimum* s. (angepflanzt), *Stratiotes aloides* s. (angepflanzt), *Syringa vulgaris* s., *Teucrium scorodonia* z., *Thesium alpinum* s., *Tofieldia calyculata* s. z., *Tragopogon pratensis s.l.* z., *Tunica prolifera* s., *Turritis glabra* s. z., *Utricularia australis* s. (angepflanzt) z., *Verbascum phlomoides* s. (Gartenflüchtling?), *Veronica anagallis-aquatica* s. z. (angepflanzt), *Veronica latifolia* s. (Kreuzlibergkuppe – Teufelskellerabhang), *Viscum album* s. z. (Tägerhard, Äsch, Unterschneisingen).

5.5 In Ausbreitung begriffene Arten (21 Arten)

Arten, deren Häufigkeit und/oder Verbreitung im Vergleich zur Jahrhundertwende möglicherweise leicht (= ?) bis auffällig deutlich (unterstrichene Namen, vgl. 5.6) zugenommen hat, gestützt auf entsprechende Angaben bei Rikli. Man beachte, dass *relative* Zunahmen gemeint sind, die Arten können durchaus selten sein (vgl. Kap. 5.4). Etliche der im Gebiet neuen Arten werden ebenfalls in Ausbreitung begriffen sein, sind hier aber wegen der fehlenden Vergleichsmöglichkeit mit früher nicht aufgeführt (Kap. 5.2, unterstrichene Arten).

Arabis alpina (?), *Buddleja davidii*, *Daphne laureola*, *Elodea canadensis*, *Epipactis atropurpurea* (?), *Epipactis purpurata* (?), *Galinsoga quadriradiata ssp. hispida*, *Gladiolus paluster*, *Glyceria maxima*, *Hypericum hirsutum*, *Ilex aquifolium*, *Iris sibirica*, *Oenothera biennis*, *Polygonum cuspidatum*, *P. dumetorum*, *Polystichum lobatum*, *Senecio erucifolius*, *Taxus baccata*, *Veronica filiformis*, *Veronica serpyllifolia*, *Vinca minor*.

5.6 Deutungsversuche des Florenwandels

Über landschaftliche und ökologische Veränderungen während der letzten Jahrzehnte und ihr Einfluss auf Flora und Vegetation existiert eine umfangreiche

Literatur, auf die hier verwiesen sei (z. B. H.U. Stauffer in E. Kessler, 1969, H. Keller, J. Hartmann, 1986, E. Landolt et al., 1982, R. Maurer et al., 1986). Ich beschränke mich auf den Vergleich einiger ökologischer Zeigerwerte von Arten, die in Rikli (M. Rikli, 1907) namentlich erwähnt sind und von denen Häufigkeits- bzw. relativ bis sehr genaue Fundortsangaben vorliegen. Von diesen Arten lässt sich auf Grund eines Vergleichs mit der heutigen Situation praktisch mit Sicherheit sagen, dass sie im Lägerngebiet häufiger bzw. seltener geworden sind.

Daphne laureola und *Taxus baccata* waren um die Jahrhundertwende – im Gegensatz zu heute – offensichtlich ausgesprochen selten zu finden (vgl. Kap. 3.22 und 3.41). Auch wenn letztere früher zurückgedrängt und in letzter Zeit vermehrt angepflanzt wurde, so steht doch fest, dass für ihr Fortkommen gute Standortsbedingungen bestehen. *Polystichum lobatum (Aspidium aculeatum v. lobatum)* kommt heute da und dort, auch auf der Lägernsüdseite, vor (vgl. Kap. 3.41).

Andererseits sind *Lathyrus tuberosus* und *L. heterophyllus,* zwei licht- und wärmeliebende Arten, die u. a. im Wallis und im Randengebiet Verbreitungsschwerpunkte haben (vgl. Welten-Sutter-Atlas, Nr. 850, 853), ebenso aus dem Gebiet verschwunden wie *Ophrys sphecodes* und *Thesium rostratum* (vgl. 3.21). *Juniperus communis* ist viel seltener geworden und fehlt heute beispielsweise auf dem Bösbuck, wo er nach Rikli *massenhaft* vorgekommen sein soll. Und auf den Rückgang der drei Ginsterarten *(Genista germanica, G. tinctoria* und *Cytisus sagittalis)* habe ich im Kap. 3.3 und 4 hingewiesen. *Saxifraga tridactylites,* diesen ausgesprochenen Trockenheitszeiger, fand Rikli noch im oberen Bergwald und auf dem Grat; heute ist sie dort sehr selten, kommt aber häufig auf den prall beschienenen Bahntrassees vor. *Anthericum liliago,* noch bis 1955 belegt (Kap. 3.51), ist verschwunden, und von den zerstreuten und eher mageren Vorkommen von *Anthericum ramosum* kann man gewiss nicht mehr sagen, sie «erinnern unwillkürlich an mediterrane Vegetationsbilder» (M. Rikli, 1907, S. 22). *Carex halleriana* ist von der westlichen der beiden in Riklis Karte eingezeichneten Fundstellen, dem fast völlig von Wald überzogenen Goldwandfelsen, verschwunden (Kap. 4).

Interessant ist nun ein Vergleich der ökologischen Zeigerwerte obiger Arten für die Licht- (L), Temperatur- (T) und Kontinentalitätszahl (K), gestützt auf E. Landolt, 1977.

Es fällt auf, dass die Zahlen einer Art gesamthaft (wobei das Produkt als visuelle Stütze dienen soll) bei den häufiger gewordenen Arten *tiefer,* bei den selteneren oder verschwundenen Arten *höher* liegen. Gewisse Ausnahmen bilden *Genista germanica,* die noch relativ häufigste der 3 Ginsterarten, und *Alnus viridis* mit T = 2, im weiteren alle Ginster und die Riemenzunge bezüglich der Kontinentalitätszahl, für sich allein genommen. Andererseits laufen bei den drei Ginsterarten die Licht- und Temperatur-Zahlen in ihrer Kombination geradezu parallel zum Rückgangs-Ausmass (vgl. Kap. 3.3). Bei den Arten mit T = 2 handelt es sich um Gebirgs- und boreale Pflanzen, die nur «an kühleren und konkurrenzarmen Stellen vereinzelt bis in die Tieflagen» vordringen (E. Landolt, 1977). Sie sind alle verschwunden. Bei den übrigen schwankt die Temperaturzahl wenig und ist überall relativ hoch. Die markantesten Unterschiede sind bei der Lichtzahl zu verzeichnen:

Tabelle 13 Ausgewählte ökologische Zeigerwerte häufiger gewordener bzw. zurückgegangener Arten nach E. Landolt (1977). Es bedeuten (vereinfacht): L = Licht- (1 = Schatten-, 5 = Lichtzeiger), T = Temperatur- (1 = Kälte-, 5 = Wärmezeiger) und K = Kontinentalitätszahl (1 = ozeanisch, 5 = kontinental).

Table 13 Choosed indicator values of more frequent respectively more rare species after E. Landolt (1977). It means (simplified): L = light (1 = shady, 5 = light), T = temperature (1 = cold, 5 = warm) und K = continent (1 = oceanic, 5 = continental).

Art	L	T	K	Produkt L*T*K
verbreitetere, häufigere Arten:				
Daphne laureola	2	4	2	16
Polystichum lobatum	2	3	2	12
Taxus baccata	2	4	2	16
Zurückgegangene, z. T. verschwundene Arten:				
Alnus viridis	4	2	2	16
Anthericum liliago	4	4	4	64
Anthericum ramosum	3	4	3	36
Botrychium lunaria	4	2	3	24
Carex halleriana	3	4	4	48
Coeloglossum viride	4	2	3	24
Cytisus (Genista) sagittalis	4	4	2	32
Dianthus superbus	4	2	3	24
Genista germanica	3	3	2	18
Genista tinctoria	4	3	2	24
Gentiana verna	4	2	3	24
Himantoglossum hircinum	4	5	2	40
Juniperus communis	4	4	4	64
Lathyrus heterophyllus	4	3	4	48
Lathyrus tuberosus	4	4	4	64
Ophrys sphecodes	3	4	4	48
Pulsatilla vularis	4	4	4	64
Saxifraga tridactylites	4	4	3	48
Thesium rostratum	3	4	4	48

Schattenzeiger sind in Ausbreitung begriffen, Lichtzeiger sind am Zurückgehen oder bereits verschwunden.

Diese Änderungen in Häufigkeit und Verbreitung gewisser Arten während der letzten 100 Jahre können als Anpassungen an veränderte mikroklimatische und ökologische Bedingungen, verursacht durch gewandelte Methoden der Land- und Forstwirtschaft und unterstützt durch eine erhöhte Düngung aus der Atmosphäre, verstanden werden. Es ist aber zumindest nicht ausgeschlossen, dass sich darin ausserdem ein grossräumiger Klimawandel bemerkbar macht, den man kurz mit «Ozeanisierung» charakterisieren könnte: Es ist, als ob sich die Flora des Lägerngebietes an ein zunehmend ausgeglicheneres, weniger extremes, ozeanischeres

Klima anpassen würde. Auch fragt sich, ob darüber hinaus für den Rückgang der lichthungrigen Arten stärker lichtabsorbierend gewordene Luftschichten verantwortlich gemacht werden müssen. Und hieran knüpft sich die Frage, was mit den an extreme Standortsbedingungen angepassten Arten (etwa der Felsgebiete) geschehen wird, bzw. geschehen soll (vgl. Kap. 6.3).

Obwohl die Erklärungen für die Zusammensetzung und den Wandel einer Flora nicht auf einen einfachen Nenner zu bringen sind, so zeigen die vorliegenden Tatsachen doch, wie empfindlich die Flora eines Gebietes auf langsame und stetige Änderungen der Standortsfaktoren reagiert und wie solche sich kaum sofort bemerkbar machenden und in ihren komplexen Wechselwirkungen nur schwer direkt beobachtbaren Faktorenänderungen durch das Aufdecken eines Florenwandels *indirekt, aber in ihrer summierten Auswirkung*, nachgewiesen werden können – und schliesslich, dass «...eine eingehendere Bearbeitung eines so kleinen Gebietes eines gewissen Reizes nicht entbehrt und dass selbst in unserer näheren Heimat noch viele ungelöste Fragen der Beantwortung harren» (M. Rikli, 1907).

6 Abschluss und Ausblick

6.1 Die Lägernflora als Teil der Schweizer Flora

Bei den folgenden Arten ist das Vorkommen im Lägerngebiet im Vergleich zur Gesamtverbreitung in der Schweiz bemerkenswert. Die Zahlen bedeuten die Nummern der Verbreitungskarten im Welten-Sutter-Atlas (M. Welten, R. Sutter, 1982).

Lägerngebiet als östlichstes Jura-Vorkommen:

Adenostyles alliariae 1823, *Adenostyles glabra* 1824, *Asplenium fontanum* 43, *Carex halleriana* 2476, *Daphne laureola* 1023, *Digitalis lutea* 1484, *Iris germanica* 2129, *Saxifraga paniculata* 660, *Scilla bifolia* 2087, *Thesium alpinum* 156, *Valeriana montana* 1664.

Alpen-/Jurapflanzen: Lägerngebiet als östlichstes Kettenjura-Vorkommen:

Arabis alpina 525, *Arabis turrita* 519, *Carlina acaulis* 1855, *Cirsium acaulon* 1880, *Cotoneaster integerrima* 766, *Helleborus foetidus* 348, *Melica ciliata* 2242, *Quercus pubescens* 144, *Rosa spinosissima* 676, *Seseli libanotis* 1144, *Sorbus mougeotii* 764, *Stachys alpina* 1401, *Thalictrum minus* 431, *Thlaspi montanum* 566, *Tunica prolifera* 333.

Östlich des Lägerngebietes eine Verbreitungslücke (teilweise aber wohl vorhanden):

Arabis arenosa 508, *Arctium minus* 1860, *Arctium nemorosum* 1861, *Asplenium viride* 42, *Cardamine pentaphyllos* 494, *Carduus nutans* 1865, *Herminium monorchis* 2532, *Hypericum hirsutum* 1031, *Leucojum vernum* 2116, *Lonicera alpigena* 1649, *Malva alcea* 1017, *Mercurialis annua* 959, *Papaver dubium* 438, *Phyllitis scolopendrium* 53, *Polystichum lonchitis* 64, *Ribes alpinum* 667, *Rumex acetosella* 183, *Rumex scutatus* 184, *Satureja acinos* 1418, *Satureja calamintha* 1420, *Sedum album* 626, *Sedum telephium* 616, *Senecio fuchsii* 1835, *Stachys alpina* 1401, *Teucrium montanum* 1374.

Lägerngebiet als Verbreitungsinsel:

Alyssum montanum 531, *Bupleurum longifolium* 1160, *Ceterach officinarum* 52 (dauerhaft?), *Cyclamen neapolitanum* 1261 (dauerhaft?), *Dianthus deltoides* 340 (dauerhaft?), *Gladiolus paluster* 2132 (angepflanzt), *Lactuca perennis* 1942, *Lilium bulbiferum ssp. croceum* 2083, *Muscasri comosum*

2088, *Ornithogalum nutans* 2086, *Rhododendron ferrugineum* 1219, *Rosa pendulina* 679, *Sedum hispanicum* 633, *Sorbus mougeotii* 764.

6.2 Arten mit interessantem Verbreitungsmuster

Die folgenden Arten weisen innerhalb des (weitgefassten) Lägerngebietes eigenartige Vorkommen und Verbreitungslücken auf.

Mit dem Martinsberg-Österliwald-Gebiet erreichen *Cardamine pentaphyllos* und *Pulmonaria officinalis s.l.* (letztere im Nuechtal noch häufig, im Teufelskeller und am Kreuzlibergabhang zerstreut) und mit dem Hundsbuck *Scilla bifolia* ihr östlichstes Vorkommen, auf der eigentlichen Lägern fehlen alle drei. Auf der Westseite des Geissberges ist *Lathyrus niger* recht häufig, auf der Ostseite und auf der Lägern fehlt sie fast ganz. Ausgesprochene Westgratpflanzen sind *Thlaspi montanum* und *Quercus pubescens* (beide bis fast zum Wettingerhorn) und – etwas weniger deutlich – *Lilium bulbiferum ssp. croceum*. Andererseits ist *Carduus defloratus* auf dem Ostgrat häufiger. *Lilium martagon* zeigt lokale Häufungen, so im Wald oberhalb der Goldwand, im Wildpark und am Ostabhang des Geissberges.

6.3 Naturschutz im Lägerngebiet

Dass das Lägerngebiet – das einzige grössere Kalkgebiet des Kantons Zürich – mit seiner Flora *als ganzes* und mit all seinen Landschaftselementen einmalig und erhaltenswert ist, bedarf keines weiteren Beweises; dass auf Bundesebene[2] und von kantonaler[3] und kommunaler[4] wie auch von privater[5] Seite beachtenswerte Anstrengungen für den Erhalt dieser Naturgüter unternommen werden, ist erfreulich und soll hier erwähnt werden. Auch auf Forschungsprojekte an den Zürcher Hochschulen, die direkt oder indirekt den Naturschutz betreffen, sei hier ausdrücklich hingewiesen (vgl. E. Landolt und P.K. Endress in H.P. Ruffner, 1990, sowie die Literaturhinweise im Kap. 5.6).

Besonders schutzwürdig scheinen mir

lokalhistorisch bedeutsame Arten (eine Schutzkategorie, in der sich Natur- und Kulturgeschichte überschneiden und die hier betont und hervorgehoben sei, vgl. Kap. 4);

im Gebiet seltene oder zurückgegangene Arten (unterstrichene Namen im Kap. 5.4);

[2] Ein grosser Teil des hier berücksichtigten Gebietes ist im Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (Eidg. Dep. des Innern, 1977) unter «Lägerengebiet» (Karte 1011) erfasst und geschützt.

[3] Im Kanton Aargau wurde 1986, von R. Maurer angeregt, ein Mehrjahresprogramm «Erfolgskontrolle der Natur- und Landschaftsschutzmassnahmen im Kanton Aargau» gestartet, innerhalb dessen das Projekt «Die Pflanzenwelt der Jurafelsen – Bestand und Entwicklung» unter Leitung von St. Zimmerli verwirklicht werden soll. Im Kanton Zürich wird gemäss Auskunft von A. Keel ein Naturschutz-Gesamtkonzept erarbeitet, welches u. a. ebenfalls Erfolgskontrollen anstrebt.

[4] Die Gemeinden sind beauftragt, ein Landschaftsinventar zu erstellen.

[5] Erwähnt seien hier die Aktivitäten der verschiedenen Natur- und Vogelschutzvereine und der Naturforschenden Gesellschaften.

pflanzengeographisch bemerkenswerte Arten (vgl. Kap. 6.1 und 6.2).

Hier muss auf den *steigenden Wert kleiner und oft wenig beachteter Lokalitäten und Standorte* aufmerksam gemacht werden: auf Strassenborde, Kahlschläge, Steinbrüche und andere offene Stellen im Wald (vgl. Kap. 3.42 und 3.43), auf «wüste Plätze» wie Brachflächen, Schutthalden, Kiesgruben und Strassenränder der offenen Landschaft und auf Kontaktzonen zwischen grossflächigen Vegetationsformen, namentlich Waldränder (vgl. Kap. 3.3 und unten), Feld- und Ackergrenzen und auf Uferzonen. Es scheint, dass viele der heute seltenen und bedrohten Arten um die Jahrhundertwende und auch später noch in flächenmässig bedeutenden Pflanzengesellschaften recht häufig vorgekommen sind und heute auf solche kleinen Lokalitäten abgedrängt werden; andererseits sind grosse Flächen der Landschaft relativ artenarm (Futterwiesen, Monokulturen, Forste), und analog zum Florenwandel könnte man hier geradezu von einem *Wertwandel bestimmter Lokalitäten und Lebensräume* sprechen.

Folgende Waldgebiete sollten speziell *im Hinblick auf den Erhalt seltener und sonstwie beachtenswerter Arten der Krautschicht* unterhalten und bewirtschaftet werden: ganze Gratzone mit allen Felsfluren (über Interessenskonflikte vgl. unten), alle grösseren Felsgebiete (Heerenbüngert-Tagloch, Wettingerhornfelsen, Walhallafelsen, Burghorngebiet, Eislochgebiet [sollte Naturschutzgebiet werden!], Pfeiferrütifluh, Felsen im Ruinengebiet, um Regensberg, Geissbergfelsen samt Goldwandgebiet, Steinbuck-Felskopf, Gipsgrubenfelsen [Problem der Verwitterung!], Martinsberg, Hundsbuck [ohne Zerstörung der Eibenpopulation!], Schloss-Stein-Felsen), Teufelskeller (Farne!), nördlich Zelgli [Würenlos], Spaltenfluh (Farne!), sowie Teile des Baderweggebietes.

Der Erhalt der Waldrandarten könnte gewährleistet, überhaupt die Schaffung artenreicherer Waldrandzonen angestrebt werden durch ein örtlich und zeitlich gestaffeltes Auslichten und durch den Erhalt eines als Magerwiese bewirtschafteten Streifens von (je nach topographischen Gegebenheiten) etwa 10 bis 50 Metern Breite; dies namentlich entlang besonders wichtiger Waldrandabschnitte (Wettingen: «Berg» und «Lätte», Würenlos: «Bifig» und «Zelgli», Otelfingen: «Balzenrüti», «Langacher», «Witschgenbüel» und «Breitle», Boppelsen: «Bingert», «Loch», «Grimmrüti», Geissbergsüdseite und nördlich der Boppelser Weid). Die geeignetste Bewirtschaftung müsste durch gegenseitige Absprachen zwischen Forst- und Landwirtschaft festgelegt werden.

Gefährdungsfaktoren und *Schutzmassnahmen:*

An erster Stelle muss auf das *Beschattungsproblem* hingewiesen werden (vgl. Kap. 5.6); es scheint mir besonders aktuell und wird nach meinen Erfahrungen als Gefahr oft noch unterschätzt. Dass der Wald bedroht ist, ist weiten Kreisen bewusst; *dass der Wald aber selber zum bedrohenden Faktor wird, darf nicht erst erkannt werden, wenn der sich abzeichnende, stetig voranschreitende Rückgang lichthungriger Arten der Krautschicht des Waldes und der für das Lägerngebiet so charakteristischen Grat- und Felsfluren so weit vorangekommen ist, dass er zum Aussterben dieser Arten geführt haben wird.* Die Felsfluren, diese «floristisch reichsten Stellen der Lägern» (M. Rikli, l.c. S. 36), werden durch den aufkommenden Wald immer mehr beschattet, wodurch der Standort, auf dem nur ausgesprochene Spe-

zialisten existieren können, zunehmend weniger extrem wird; es setzen sich Sträucher (namentlich *Prunus spinosa)* und grosse Stauden fest, und die Sukzession schreitet voran.

Dieser Prozess (der ja auch alle im Kap. 3.2 besprochenen offenen Landschaftsteile bedroht und einen regelmässigen Schnitt erfordert) müsste gestoppt und teilweise rückgängig gemacht, der Wald in der Umgebung der Felsen und des Grates (und auch an anderen Stellen, namentlich im Baderweg- und Gipsgrubengebiet) *behutsam aber gründlich* ausgelichtet und die Kronen einzelner schattenspendender Bäume ausgeastet werden. Mit flächenmässig begrenzten, auf die Besonderheiten der Lokalitäten Rücksicht nehmenden, methodisch ideen- und variantenreichen und zwischen den Kantonen Aargau und Zürich abgesprochenen *Pilotprojekten* müssten *möglichst bald* Erfahrungen für langfristige, umfassende und dynamische Pflege- und Gestaltungsmassnahmen gesammelt werden können. Solche Eingriffe sind nötig, wenn die landschaftliche Vielgestaltigkeit und floristische Reichhaltigkeit des Lägerngebietes erhalten, vielleicht sogar gesteigert, das Gebiet aber auch vor musealer Erstarrung bewahrt werden soll.

Wichtige Hinweise finden sich bereits bei Rikli (l.c. S. 29): «Der eigentliche Gratwald wird ungefähr alle 30–35 Jahre hauweise kahl geschlagen...» und S. 39: Der Blauschwingelrasen kommt «nur in Südlage, an den trockensten und heissesten Stellen, so z. B. beim Burghorn und ob Bussberg» vor. Und weiter (S. 40) zitiert er Schröter: *Himantoglossum hircinum* «wird allmählich überwachsen». Rikli fand noch 1 Exemplar an «steinig-dürrer Stelle bei 630 m», am 7. Juni 1904, gemäss seiner Karte westlich der oberen östlichen Bussbergwiese. Da ist es heute – wie an vielen anderen entsprechenden Stellen – nicht mehr steinig-dürr! Und weiter S. 16: «An steileren Abhängen mit südlicher Exposition herrscht ein 2–3½ m hohes Waldgestrüppe»; dies ist heute fast überall deutlich höher. Auch Cuny weist auf dieses Problem hin: «Der Hagebuchenwald am Lägerngrat ist noch ein Überrest solcher Niederwälder ..., doch auch er wandelt sich nun langsam in einen Buchen-Hochwald um» (R. Cuny, 1983, S. 56).

Ein weiterer Gefährdungsfaktor ist die *zunehmende mechanische Belastung* des Gebietes durch Begehen und Befahren. Seit etwa drei, vier Jahren kann man beispielsweise auf dem Grat (!) immer öfter Velofahrern, mitten im Wald Joggern begegnen; obwohl eine Beschädigung (noch) nicht festgestellt werden kann, ist die Entwicklung im Auge zu behalten.

Bild 6 Das Burghorn, Blick gegen Osten. Die interessante Felsflora alpinen Charakters wird vom expandierenden Wald zunehmend beschattet und bedroht.

Fig. 6 The Burghorn, looking towards the east. The interesting rock flora of alpine character is increasingly becoming shaded and threatened by the expanding wood.

Besonders problematisch wird die Situation für blumenreiche Wiesen, namentlich für den Bussberg und die Boppelser Weid, die mehr und mehr von erholungssuchenden Menschen und Blumenphotographen, aber auch von Wissenschaftlern und Exkursionsteilnehmern aufgesucht und begangen werden. Dies ist einerseits zu begrüssen – Naturschutz lässt sich ohne breite Interessensbasis nicht verwirklichen –, andererseits aber geraten diese Gebiete mehr und mehr unter Druck – und nicht nur Orchideen vertragen das Betreten nicht!

Hier muss auch noch auf den Wildverbiss *(Lilium martagon* und die äusserst seltene *Campanula cervicaria* beispielsweise werden oft abgefressen) und auf das Ausgraben von attraktiven Pflanzen (namentlich *Lilium bulbiferum* und Orchideenarten) aufmerksam gemacht werden.

Der letzte Gefährdungsfaktor, den ich besprechen möchte, ist kognitiver Art: *Bedrohung durch Nichtwissen.*

Jüngst wurden Gebäulichkeiten beim Triangulationspunkt (Hochwacht) erweitert und dabei wahrscheinlich die meines Wissens *einzige Fundstelle von Medicago falcata* – ahnungslos und unabsichtlich – vernichtet. Es wäre wohl ein leichtes gewesen, diese Art in der Nähe zu erhalten, wenn ihr reales Vorkommen und ihre Seltenheit bekannt gewesen wäre. Die Art ist nun möglicherweise nicht nur vom Hochwachtgebiet, sondern *vom ganzen Lägerngebiet* verschwunden.

Cytisus sagittalis kommt noch an *einer einzigen Stelle* – hier aber in durchaus ansehnlichen Gruppen – vor; steht man davor, so kommt man nicht auf den Gedanken, dass es sich dabei *um die letzten Exemplare des ganzen Lägerngebietes* handelt (vgl. Kap. 4).

Ein grosser Teil der *Ornithogalum-nutans*-Wiese in Otelfingen wurde im Frühjahr 91 in einen Acker verwandelt. Es ist nicht anzunehmen, dass der bewirtschaftende Bauer wusste, was für lokalhistorische und pflanzengeographische Werte er umpflügte; vielleicht hätte er mit dem nötigen Wissen (und einer finanziellen Abgeltung) diese besondere Wiese erhalten.

Viele floristisch interessante Flächen befinden sich in *Baugebieten.* Durch ihre Grossflächigkeit (artenreiche Blumenwiesen, namentlich an Südhängen) oder aber Unscheinbarkeit (Wegborde u. ä.) wird es einem kaum bewusst, dass «so gewöhnliche Heuwiesen» heute recht bedrohte, seit Jahrzehnten in stetem Rückgang befindliche Vegetationsformen darstellen. Es wäre zu wünschen, dass in kommunalen Bauordnungen ganz allgemein und beim Erteilen von Baubewilligungen im speziellen auf solche Werte – zusammen mit der Naturgartenidee, vgl. unten – aufmerksam und konkrete Vorschläge zur Erhaltung derselben gemacht werden könnten.

In diesem Zusammenhang muss – jedenfalls bezogen auf bestimmte Arten und auf das untersuchte Gebiet – auf nicht mehr zutreffende Häufigkeitsangaben in Bestimmungsbüchern und auf die diesbezüglich problematische Signatur in den Verbreitungskarten des Welten-Sutter-Atlasses hingewiesen werden (vgl. Kap. 5.35 und 5.4); auch an das oben erwähnte Missachten und Fehleinschätzen des Wertes gewisser Standorte sei hier nochmals erinnert.

Beim Verwirklichen von Naturschutzmassnahmen werden gelegentlich auch *Konflikte* gelöst werden müssen. Zwei Beispiele: Auf dem Bussberg wachsen die

wohl einzigen und für das ganze Lägerngebiet letzten Exemplare von *Muscari comosum* (Kap. 3.22). Die wenigen Pflanzen, die noch vorkommen, könnten durch das Aufkommen der südlich angrenzenden, gegenwärtig aber ganz zurückgeschnittenen Hecke in ihrer Existenz bedroht werden. Soll nun dem im Kanton Aargau beschlossenen Heckenschutz Nachachtung verschafft und die Wiederherstellung konkret dieses Heckenstückes rigoros durchgesetzt werden, oder soll *an dieser Stelle* der Erhalt der äusserst seltenen, lichthungrigen, aber eben nicht namentlich geschützten schopfartigen Bisamhyazinthe Vorrang haben? Ich neige entschieden zu letzterem – Neuanpflanzungen von Hecken sollten grundsätzlich nicht auf Kosten artenreicher, sonniger Wiesenstücke vorgenommen werden.

Und weiter: Für den Erhalt der Grat- und Felsflora ist die Expansion des umgebenden Waldes zurückzudämmen (vgl. oben); andererseits ist dieser Busch- und Heidewald selber sehr charakteristisch für das Gebiet und ist – in einer ursprünglicheren, lichteren Form – durchaus erhaltenswert.

Auch auf Möglichkeiten *neuschaffenden Naturschutzes* sei hier hingewiesen, insbesondere auf das Einpflanzen seltener und bedrohter Arten, auf das Neuschaffen von Biotopen und auf das naturnahe Gestalten von Gärten, Parks u. ä. (Naturgartenidee). Auf die bereits geschehenen erfolgreichen Anpflanzungen von *Gladiolus paluster* und *Iris sibirica* bin ich im Kap. 3.23 und auf das wenigstens teilweise erfolgversprechende Aussetzen von Wasserpflanzen im Kap. 3.1 eingegangen. Dass dieses Unterfangen nicht bei allen Arten gelingt, zeigt der misslungene Pflanzversuch von *Ranunculus circinatus* und wohl auch von *Potamogeton coloratus;* die natürlichen Vorkommen solcher Arten sind ganz besonders schützenswert. Namentlich Anpflanzungsversuche mit Ruderal- und Segetalarten («Unkräuter») wären meiner Meinung nach zu begrüssen.

Solche Anpflanzungen sind pflanzengeographisch (Florenverfälschungen) und ökologisch (mögliches Verdrängen anderer Arten) nicht unproblematisch und müssen gut überdacht werden; andererseits: wer garantiert, dass das für das Lägerngebiet so interessante und charakteristische, gesamtschweizerisch gesehen isolierte Vorkommen der Feuerlilie *(Lilium bulbiferum ssp. croceum)* nicht auf menschliche Aktivitäten zurückgeht?

Abschliessend möchte ich nochmals auf die grosse Bedeutung des hier besprochenen Gebietes für *Exkursionen* zurückkommen. Den in der Umgebung gelegenen Schulen, namentlich Mittel- und Maturitätsschulen, bietet das Lägerngebiet viele und hervorragende Möglichkeiten für die Behandlung biologischer, insbesondere aber auch interdisziplinärer Themen. Naturschutzprobleme können hier in vielfältiger und ganzheitlicher Art und Weise und vor einem weiten geographisch-geschichtlich-kulturpolitischen Hintergrund vorgezeigt und diskutiert, und es kann eine direkte Beziehung zur näheren Heimat aufgebaut werden.

7 Literatur

Binz, A., Becherer, A., Heitz, Ch. (1980): Schul- und Exkursionsflora für die Schweiz, mit Berücksichtigung der Grenzgebiete. Schwabe & CO AG, Basel. 17. A. 422 Seiten; 1. Aufl. 1920, 401 Seiten; 18. Aufl. 1986, 624 Seiten.

Bohny, P. (1951): Martin Rikli. Verh. Schweiz. Natf. Ges. *131*, 378–382.

Bonnier, G., Douin, R. (1911–1935, 1990): La grande Flore en couleurs de France, Suisse, Belgique et pays voisins. Editions Belin, Paris. Bd. 1: Tafeln 1–467, Bd. 2: Tafeln 468–729; Bd. 3: 26 + 676 Seiten, Bd. 4: 31 + 725 Seiten.

Brüschweiler, R.W., Kottmann, A., Senft, F., Oettli, M. (1978): Geschichte der Gemeinde Wettingen. Mit 2 Karten. Baden Verlag. 680 Seiten.

Cuny, R. (1983): Die Pflanzengesellschaften der Lägern (Schweiz: Jura). Mit 2 Karten, 1 Abb. und 2 Tab. Mitt. Aarg. Natf. Ges. *30*, 5–64.

Danesch, O. und E. (1962): Orchideen Europas. Mitteleuropa. Hallwag Bern und Stuttgart. 264 Seiten.

Egloff, F. (1974): Neue und beachtenswerte Arten der Schweizerflora. Ber. Schweiz. Bot. Ges. *84.4*, 333–342.

Egloff, F. (1977): Wasserpflanzen des Kantons Zürich. Die heutige Verbreitung und jüngste Geschichte der aquatischen Angiospermen. Vjschr. Natf. Ges. Zürich, *122.1*, 1–140. (Diss.)

Eidg. Departement des Innern (1977): Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung; Blatt 1011, Lägerengebiet. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Ellenberg, H. (1963): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen, in kausaler, dynamischer und historischer Sicht. Eugen Ulmer, Stuttgart. 1. Aufl. 945 Seiten.

Ellenberg, H. (1979): Zeigerwerte der Gefässpflanzen Mitteleuropas. Erich Goltze KG, Göttingen. 2. Aufl. 122 Seiten.

Fitschen. J. (1959): Gehölzflora. Quelle & Meyer, Heidelberg. 5. Aufl. 391 Seiten.

Güller, A. (1968): Das «Eisloch» an der Lägern. Eine lokalklimatische Untersuchung. Vjschr. Natforsch. Ges. Zürich, *113.1*, 103–118.

Hantke, R. und Mitarbeiter (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. 2 Karten 1 : 50 000. Sonderabdruck aus Vjschr. Natf. Ges. Zürich, *112.2*, 91–122. Kommissionsverlag Leemann, Zürich.

Hegi, G. (1906–36): Illustrierte Flora von Mitteleuropa. Bd. IV.2, Lehmanns Verl., München. 1. Aufl. Seite 529.

Heim, A. (1919): Geologie der Schweiz. Bd. 1. 704 Seiten, Photo S. 459. Chr. Herm. Tauchnitz, Leipzig.

Hess, H. E., Landolt, E., Hirzel, R. (1976): Bestimmungsschlüssel zur Flora der Schweiz und angrenzender Gebiete. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart. 1. Aufl. 657 Seiten.

– (1967, 1970, 1972): Flora der Schweiz und angrenzender Gebiete. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart. 1. Aufl. Bd. 1: 858 Seiten, Bd. 2: 956 Seiten, Bd. 3: 876 Seiten.

Keller, R. (1931): Synopsis rosarum spontanearum Europae mediae. Übersicht über die mitteleuropäischen Wildrosen mit besonderer Berücksichtigung ihrer schweizerischen Fundorte. Denkschr. Schweiz. Natf. Ges. Band LXV. Atlasband mit 40 Tafeln, Textband 796 Seiten.

Keller, H. und Hartmann, J. (1986): Ausgestorbene, gefährdete und seltene Farn- und Blütenpflanzen im Kanton Aargau: Rote Liste Aargau. Mitt. Aarg. Naturf. Ges. *31*, 189–216.

Kessler, E. (1969): Bedrohte Vielfalt. Die Untersuchungen Dr. Hans Ulrich Stauffers über die Flora des Kantons Aargau und sein massgebender Beitrag für eine zeitgemässe Naturschutzplanung im Reusstal. Zusammenstellung Erich Kessler. Kulturstiftung Pro Argovia, Sauerländer AG. Aarau. 115 Seiten.

Klötzli, F. (1969): Die Grundwasserbeziehungen der Streu- und Moorwiesen im nördlichen Schweizer Mittelland. Beitr. zur geobot. Landesaufn. der Schweiz. Hans Huber, Bern. *52*, 1–296.

Kölliker, A. (1839): Verzeichniss der Phanerogamischen Gewächse des Cantons Zürich. Orell Füssli-Verlag Zürich, 156 Seiten.

Kohler, J. (1987): Die Schmetterlinge der Boppelser Weid. Heimatkundliche Vereinigung Furttal. 103 Seiten.

Landeskarte der Schweiz. 1:25 000, Blatt 1070 (Baden) und Blatt 1071 (Bülach).

Landolt, E. (1977): Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröff. d. Geobot. Inst. ETH. *64*, 1–208.

Landolt, E., Fuchs, H.-P., Heitz, Ch. und Sutter, R. (1982): Bericht über die gefährdeten und seltenen Gefässpflanzen der Schweiz («Rote Liste»). Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel. *49*, 195–218.

Lüscher, H. (1918): Flora des Kantons Aargau. Sauerländer-Verlag Aarau, 13 + 217 Seiten.

Maurer, R., Keller, H. und Stocker, G. (1986): Grundlagen des Natur- und Landschaftsschutzes im Aargau. Mitt. Aarg. Naturf. Ges. *31*, 347–437.

Mühlberg, F. (1880): Die Standorte und Trivialnamen der Gefässpflanzen des Aargaus. Sauerländer Aarau, 24 + 246 Seiten.

– (1902): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Lägernkette. A. Francke, Bern. 270 Seiten.

Naegeli, O. (1928): Über Veränderungen der Zürcher Flora im letzten Jahrhundert in Berücksichtigung der Nachbargebiete. Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Natf. Ges. in Zürich. *15* (Festschrift Hans Schinz), 601–641.

Notz, R. (1924): Geologische Untersuchungen an der östlichen Lägern. Gebr. Leemann & Co. AG, Zürich, mit 1 Karte und mehreren Profilen. 59 Seiten. (Diss.).

Rikli, M. (1907): Das Lägerngebiet. Mit 1 Karte, 1 Formationsprofil und 4 Autotypien. Ber. Schweiz. Bot. Ges. *17*, 5–83. (Mit Verzeichnis wichtiger Lägern-Literatur).

– (1925): Alpin-arktische Arten und einige Bemerkungen über die Beziehungen der Flora unserer Alpen mit derjenigen der Polarländer. Veröff. Geobot. Inst. Rübel in Zürich. *3* (Festschrift Carl Schröter), 96–108.

Ruffner, H.P. et al. (1990): Die Zürcher Botanik auf dem Weg zur Moderne. Festschrift zum 100jährigen Jubiläum der Zürcherischen Botanischen Gesellschaft. ADAG Administration und Druck AG. 64 Seiten.

Schinz, H. und Keller, R. (1905): Flora der Schweiz, 2. Aufl. 1. Teil: Exkursionsflora, 586 S., 2. Teil: Kritische Flora, 400 S. Albert Raustein Verlag, Zürich. 1. Aufl. (einbändig): (1900) 629 Seiten; Letzte Aufl. (2 Bände): Schinz, H., Keller, R., Thellung, A., 1. Teil (Exkursionsflora), 4. Aufl. (1923), 792 Seiten, 2. Teil (Kritische Flora) 3. Aufl. (1914), 582 Seiten.

Schlechtendal, D.F.L. von, Langethal, L.E., Schenk E. (1880–1888): Flora von Deutschland. 5. Aufl., 31 Bände mit über 3280 farbigen Tafeln. E. Köhler, Gera-Untermhaus.

Senftleben, G. (1923): Beiträge zur geologischen Erkenntnis der West-Lägern und ihrer Umgebung. Mit 11 Karten bzw. Profilen. A. Peter, Pfäffikon ZH. 155 Seiten. (Diss.).

Staub, F., Tobler, L., Schoch, R. (1885): Schweizerisches Idiotikon. Wörterbuch der schweizerdeutschen Sprache. Bd. 2. J. Huber Verlag, Frauenfeld. 1840 Spalten.

Stauffer, H.U.: siehe Kessler, E. (1969).

Thommen, E. (1951): Taschenatlas der Schweizer Flora. Birkhäuser, Basel. 309 Seiten.

Tutin, T.G. et al. (1964–1989): Flora Europaea. 1+5 Bände. University Press, Cambridge.

Walter, H. (1960): Grundlagen der Pflanzenverbreitung. 1. Teil: Standortslehre. (Einführung in die Phytologie, Band 3.1). Eugen Ulmer, Stuttgart. 2. Aufl. 566 Seiten.

Weber, J. (1940/41): Neues Leben am Stausee Wettingen. Mit Zeichnungen von Doris Weber. Badener Neujahrsblätter *16*, 23–31.

Welten, M. und Sutter, R. (1982): Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen der Schweiz. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Stuttgart. 2 Bde. 716 und 698 Seiten.

– (1984): Erste Nachträge und Ergänzungen zu Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen der Schweiz. Zentralstelle der Floristischen Kartierung der Schweiz, Syst.-Geobot. Inst. Univ. Bern. 48 Seiten.

Wild, J. (1852–1868, 1990): Topographische Karte des Kantons Zürich 1:25 000. Faksimile-Ausgabe der «Wild-Karte» des Meliorations- und Vermessungsamtes des Kantons Zürich.

Wildi, W. (1983): Erdgeschichte und Landschaften im Kanton Aargau. Sauerländer, Aarau, Frankfurt a. M., Salzburg. 147 Seiten.

Prof. Dr. Fabian G. Egloff, St. Bernhardstrasse 33, 5430 Wettingen

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/4: 271–272

Jugendpreis der Naturforschenden Gesellschaft Zürich

Horst Dargel, Zürich

Im Jahrzehnt der 250-Jahr-Feier des Bestehens der NGZ ging der Jugendpreis in seinem zweiten Verleihungsjahr wiederum an das Realgymnasium Rämibühl der Kantonsschule Zürichberg. Das ist gar nicht so abwegig. Gibt es doch an diesem Gymnasium im letzten Schuljahr die Einrichtung der obligatorischen, selbständig auszuführenden Semesterarbeit, deren Thema vom Schüler selbst gewählt und von einem Fachlehrer oder manchmal von zwei Fachlehrern betreut wird. Aus der Fülle der mit viel Enthusiasmus, nicht selten mit viel Liebe zum Detail und oft mit grossem Aufwand durchgeführten Arbeiten, ragen stets einige heraus, die der Auszeichnung würdig sind. Mag gelegentlich auch der Traum vom international bedeutenden Preis der Antrieb gewesen sein, so ist die Freude des Verfassers der Arbeit nicht gering, die verdiente Anerkennung durch den Jugendpreis der NGZ zu erhalten.

Preisträgerin

Katarina Manic
Hochstrasse 66
8044 Zürich

Laudatio:

Der von der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich für besondere naturwissenschaftliche Arbeiten der Zürcher Jugend gestiftete Preis von Fr. 500.– wurde 1991 Katarina Manic, Klasse 7c des Realgymnasiums Rämibühl, für ihre hervorragende, in der medizinischen Praxis anwendbare Semesterarbeit «Evaluation von zwei Methoden zur schnellen Identifizierung von *Candida albicans*» zuerkannt.

Zürich, 13. September 1991 Naturforschende Gesellschaft in Zürich

Inhaltsangaben zur Preisarbeit:

Zur Wahl dieses Themas aus dem Bereich der diagnostischen Mykologie führte, wie die Autorin im Vorwort erwähnt, ihr Kontakt zum schulnahen Institut für Medizinische Mikrobiologie der Universität Zürich. Dort hatte sie die Möglichkeit der notwendigen Einarbeitung und Ausführung der praktischen Arbeit, wobei sie kompetente Anleitung und Unterstützung durch Frau Dr. Gertrud Schär in dankenswerter Weise erfuhr. Die Vielfältigkeit der Mykologie mit der Unsicherheit in der Systematik und den Schwierigkeiten, die die grossen Unstimmigkeiten in der Nomenklatur der Pilze bilden, vermochten sie nicht von dem mühevollen Einstieg in dieses Gebiet abzuhalten.

In ihrer Arbeit versucht Katarina Manic, zu noch offenen Fragen bestimmter Untersuchungen an *Candida albicans* Stellung zu nehmen. Es ist eine Einführung in die mykologische Diagnostik, die ihr aufgrund der Aktualität und Ausbreitung von Hefepilzen wichtig ist. Gleichzeitig will sie den Leser auf medizinisch-technische Schwierigkeiten aufmerksam machen und zum Nachdenken anregen, ohne ihm weder spezielle wissenschaftliche Vorkenntnisse abzuverlangen noch die Tatsachen zu sehr zu vereinfachen.

In der vorliegenden Arbeit setzt sich die Verfasserin umfassend und gründlich mit den Methoden zur Identifizierung von *Candida albicans* auseinander und kommt dabei zu neuen Erkenntnissen. Zunächst gibt sie in einer kurzen Einführung grundlegende Gedanken zur Allgemeinen Mykologie und besonders zur Medizinischen Mykologie wieder, um sich dann im theoretischen Teil intensiv mit den Hefepilzen, deren Systematik, Morphologie, Wachstum und Vermehrung, Pathogenität und vor allem der Diagnostik zu befassen. Nach der allgemeinen Beschreibung der Candidose wendet sie sich *Candida albicans* mit Vorkommen, Geschichte und Pathogenese zu, um sich besonders dem Krankheitsbild, den klassischen Identifizierungsmethoden und den alternativen Identifizierungsmöglichkeiten zu befassen. Dem experimentellen Teil ist wesentlich mehr Raum gegeben mit der Gliederung: Material und Methoden, Resultate, Diskussion, Bibliographie, Arbeitsprotokolle, Abbildungen.

Zweckmässige Zeichnungen, Tabellen und Fotographien ergänzen den Text und tragen zu dem guten Eindruck dieser gelungenen Arbeit bei.

Referent des Jugendpreises ist der Vertreter der Zürcher Mittelschulen im Vorstand der NGZ:
Prof. Horst Dargel, Im Ahorn 15, 8125 Zollikerberg, Telefon 391 68 89

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1991) *136*/4: 273–275

Buchbesprechungen

Georg Jung: Seen werden, Seen vergehen: Entstehung/Geologie/Geomorphologie/Altersfrage/Limnologie und Ökologie; eine Landschaftsgeschichte der Seen allgemein, mit ausgewählten Beispielen aus aller Welt. Ott-Verlag, Thun, Fr. 49.–

Zweifellos schliesst dieses neue weltumspannende Seenbuch eine lang empfundene Lücke im weiten limnologisch-hydrologischen Literaturfeld, vor allem im leicht popularisiertem Übergangsbereich.

Jungs Werk umfasst eine allgemeine und eine spezielle Seenkunde in ± ähnlich gewichteten Teilen. Dabei kann die globale Erfahrung des Autors gewinnbringend zur Vereinheitlichung dieser umfassenden Übersicht beitragen (Angaben über die besuchten Gebiete auf dem vorderen inneren Buchdeckel). Insgesamt werden einige recht bekannte, aber vielfach auch kaum auf Länderkarten auffindbare Seen und ihre aktuelle Dynamik aus allen Kontinenten vorgestellt, so aus Afrika deren 5, aus Asien 3, aus Südamerika 2 und eine Mehrheit von 9 aus Europa, davon 6 aus der Schweiz. Ästhetisch und sachlich sehr befriedigende Photos (ausser S. 23) belegen die Gebiete. Abgerundet wird die Übersicht mit einem speziellen Hauptkapitel über Seen-Landschaften verschiedener Prägung, so z. B. aus den Bereichen von Alpen, Anden, Neuseeland (S-Insel), den Dombes und Finnland.

15 Abschnitte umfasst die allgemeine Seenkunde. Alle limnologisch-hydrologischen Belange werden berücksichtigt, und zwar knapp, aber gründlich recherchiert, dargestellt. Die geomorphologischen Grundbedingungen decken die globale Vielfalt ab, also auch in Mitteleuropa weniger häufige oder nicht vorhandene Typen wie Rinnenseen (im Bereich von Osern, also Kieswällen aus subglazialen Eistunnels), Meteorkratern, vulkanischen Hohlformen, Deflationswannen, und nicht nur aus glazialer Erosion, Korrosionen in Kalk, Abdämmung von Tälern (durch Gletscher, Bergsturz usw.), tektonischen Bewegungen, Höhlen usw.

Den bestimmenden Umweltfaktoren, Wasser- und Nährstoff-Haushalt (bzw. Sedimentation, inkl. Salz-Ablagerung) wird das nötige Gewicht eingeräumt einschliesslich der Hydraulik. Weitere Kapitel umfassen die periodischen Seen (im Karst, in ariden Gebieten in Form von «Geltas» und in sehr flachen Wannen), die Ufer- und Insel-Geomorphologie, die Strömungen, das Altern sowie Physik und Chemie des Seewassers (Temperatur, Thermik, Eisbildung, Farbe, Trübe, Chemismus). Davon abhängig sind Flora und Fauna, die für einzelne Nährstoff-Stufen (von oligo- bis eutroph) als Lebensgemeinschaft vorgestellt werden. Kurze Abschnitte umfassen die Problembereiche Trinkwasser, Sanierung, künstliche Seen und Naturkatastrophen. Eine neue Seentypologie vermittelt den synthetischen Überblick (allerdings ohne diskutierende Berücksichtigung anderer bewährter Typologien, so z. B. von SUCCOW), dem sich ein lexikalischer Teil sowie ein Seenverzeichnis anschliessen.

Bei der Fülle des Gebotenen und seiner Qualität fällt es schwer, einige kritische Bemerkungen anzubringen. Ein immer noch aktueller Bereich, nämlich der Verbau der Seeufer, könnte in seinen Konsequenzen detaillierter in die Abschnitte über Ufer-Geomorphologie, Sedimentation und/oder Strömungen aufgenommen werden. Denn seit der weitgehenden «Vermauerung» vieler unserer Seeufer verändern sich die Strömungslinien und damit die Zonen von Akkumulation und Erosion, und dies ohne Rücksicht auf bereits geschützte Bereiche (vgl. SS. 58, 63). Auch wäre im Abschnitt Seewasser die Wirkung der Schwermetalle zu ergänzen.

Bei einer Neuauflage wäre schliesslich auch dem interessierten Leser mit einem Sachverzeichnis entgegenzukommen, sowie dem belesenen Wissenschaftler mit Literaturzitaten, die den gängigen Normen angepasst sind.

Als Ganzes betrachtet ist das neue Seenwerk begeisternd klar: es ist erfreulich übersichtlich geordnet, hervorragend illustriert, einschliesslich der Graphiken, und von angenehmer Lesbarkeit. Der Limnologe und Hydrologe wird es als Pflicht-Lektüre «verordnet bekommen», und den Biologen und Geographen wird Un-

kenntnis des Werkes bald als Bildungslücke ausgelegt werden.

Die zukünftige weite Verbreitung dieser bemerkenswerten Seenkunde ist schon jetzt vorauszusehen.

F. Klötzli

Werner Grüter: Leben im Meer. Wie es ist, wie es wurde, wie es werden kann. 291 Seiten, 330 Photos, davon 316 farbig, 2 Strichzeichnungen, 23 Tabellen. Ott Verlag, Thun 1990, Fr. 64.–

Das freie Tauchen mit Hilfe von Pressluftgeräten ist heute zu einer erlebnisreichen Freizeitbeschäftigung vieler geworden, die in nahen und fernen Meeren mit einem ganz neuen Raum unserer Biosphäre beglückende Bekanntschaft machen. Die anfänglich betriebene Unterwasserjagd mit furchterregenden Harpunen ist glücklicherweise weitgehend von einem Jagdfieber mit Kamera und Videogeräten abgelöst worden. Auch hier ist eine erfreuliche Entwicklung zu verzeichnen. Waren es zunächst vor allem die grosswüchsigen Meeresbewohner, welche die Aufmerksamkeit der Unterwassertouristen auf sich zogen, lenkt heute in zunehmendem Mass die fast grenzenlose Formenvielfalt kleiner und kleinster Fische und wirbelloser Tiere die Linsen der Kameras auf sich. Eine reiche Auswahl z. T. hervorragender Bilder dieser Art schenkt das Buch von Werner Grüter dem Betrachter. Die Nahaufnahmen von Schwämmen, Nesseltieren, Röhrenwürmern und zahlreichen Arten bunter Korallenfische u. a. sind aufnahme- und drucktechnisch von bester Qualität. Es sind vor allem diese Bild-Dokumente, die dem Buch den Glanz verleihen. Zweifellos zum Bedauern vieler hat der Autor darauf verzichtet, die dargestellten Tiere in den Abbildungslegenden mit ihren wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen zu bezeichnen.

Der textliche Teil des Buches vermag leider mit der Qualität der Bilder nicht Schritt zu halten. Es werden meist zusammenhangslos einzelne Kapitel mit Titeln, die z. T. aus der Regenbogenpresse stammen könnten, aneinandergereiht (z. B. «Ammen- und Glatthaie. Friedfertige unter den Killern»; «Kugel- und Igelfische. Tödlich noch nach dem Tode»). Mit grosser Begeisterung werden biologische Probleme aufgezeigt, die sich aus Bekanntem und aus Eigenbeobachtungen des Autors ergeben, aber der erwartungsvolle Leser vermisst leider meist eine in die Tiefe gehende Auseinandersetzung mit den in den Raum gestellten Fragen. Im Text sind Kästchen eingestreut, die über die systematische Stellung einer oder mehrerer besprochener Arten Auskunft erteilen sollten. Diese Informationen sind jedoch z. T. unvollständig und bedienen sich teils der korrekten wissenschaftlichen Bezeichnungen der Artengruppen, teils jedoch werden diese verdeutscht. Einen weiteren Nachteil erwächst aus der unverständlichen Tatsache, dass im Text jegliche Hinweise auf die schönen Bilder fehlen, die selber mit keinen Nummern gekennzeichnet sind und deren Erläuterungen z. T. verwirrend und unvollständig sind. Der Wert dieses Buches liegt – wie bereits hervorgehoben – in der hohen Qualität seiner Bilder.

Pierre Tardent

Heitz, C.: Schul- und Exkursionsflora für die Schweiz mit Berücksichtigung der Grenzgebiete. 19. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 659 Seiten, 860 Zeichnungen, Kunststoffeinband, Verlag Schwabe, Basel 1990. Preis Fr. 32.–

Die 19. Auflage der allgemein bekannten, 1920 zum ersten Mal erschienenen «Schul- und Exkursionsflora der Schweiz» enthält zahlreiche Korrekturen und kleinere Verbesserungen gegenüber der 18. Auflage. Der für diese Neuauflage Verantwortliche Christian Heitz gibt sie in seinem Vorwort an: sie betreffen Schlüssel, Namen, Diagnosen und Figuren, Stand- und Fundortsangaben sowie Zahlenverweise auf den Taschenatlas der Schweizer Flora von E. Thommen. Auch wurden einige zum Teil neuerdings in der Schweiz festgestellte Arten und Unterarten aufgenommen.

Eingeleitet wird das Buch von einer Erklärung, wie es zu gebrauchen ist, in welcher auch, und das ist äusserst nützlich für den Anfänger, ein Bestimmungsbeispiel gegeben wird. Eine ausführliche Erläuterung der morphologischen Fachausdrücke mit zahlreichen verdeutlichenden Zeichnungen ist den Bestimmungstabellen

vorangestellt. Zur Bestimmung von Familien stehen zwei Tabellen zur Auswahl: die eine ausgehend vom natürlichen System, die andere von den Linnéschen Klassen. Eine weitere Tabelle dient zum Bestimmen der Gattungen und Arten und gibt Diagnosen und Verbreitung der Arten an. Bibliographie, eine Übersicht der Familien und der diesen übergeordneten taxonomischen Einheiten, ein Index der morphologischen Fachausdrücke und eine Liste mit Abkürzungen unterstützen die Anwendung der Flora. Um den Anwender vor Giftpflanzen zu warnen, wäre es vielleicht besser gewesen, die Warnungen bei den einzelnen Pflanzenbeschreibungen anzugeben, anstatt in einem separaten Verzeichnis, so dass der Anwender gleich beim Bestimmen darauf aufmerksam gemacht wird.

Die den Text begleitenden Zeichnungen von Marilise Rieder sind von guter Qualität, obwohl mehr Legenden die Verständlichkeit der Zeichnungen sicher erhöhen würden. Was dieser Flora fehlt sind Zeichnungen der Einzelpflanzen. Eine Schul- und Exkursionsflora ist für den Anfänger gedacht, für den eine visuelle Übereinstimmung der von ihm bestimmten Pflanze mit einer Illustration eine notwendige Selbstkontrolle ermöglicht. Die gut anwendbaren Bestimmungstabellen enthalten viele Abkürzungen. Obwohl die Erklärung der Abkürzungen sich leicht auffindbar auf der Innenseite des vorderen Deckels befindet, macht ihre grosse Zahl es dem Anfänger nicht leicht. Das für dieses preiswerte Buch benützte Papier nimmt schnell (Regen)wasser auf, wodurch es leicht faltet und zerreist. Hierdurch wird die Eignung des Buches als Exkursionsflora eingeschränkt.

Karel J.M. Bonsen

Herbert Heinz und Wolfgang Seiberl: Bewertung und Problematik aerogeophysikalischer Anomalien im Österreichischen Bundesgebiet, Abhandlungen der geologischen Bundesanstalt, Band 44, Wien 1990, 244 Seiten, 152 Abbildungen, Preis 600 öS.

Dieses Buch enthält eine umfassende Zusammenfassung aller bis Mitte 1990 in Österreich durchgeführten aerogeophysikalischen Messkampagnen. Die ersten drei Kapitel der Arbeit enthalten eine kurze technische und methodische Einführung in die Aerogeophysik. Darin werden die verwendeten Messinstrumente, die Auswertemethodik und die Planungsgrundlagen vorgestellt.

Mit Flugzeugen wurde das gesamte Gebiet Österreichs aeromagnetisch vermessen (Totalfeld). Die Resultate dieser Messungen sind im vierten Kapitel zusammengestellt. Neben den aeromagnetischen Karten im Anhang findet man in diesem Kapitel auch eine Bewertung und Diskussion der Daten in Tabellenform. Darin sind, nach Regionen geordnet, für jede identifizierte Anomalie, die Problematik, die anzuwendende Methodik, die bisherige Tätigkeit, die geologischen Bezüge sowie der Planungsstand aufgeführt.

Den Abschluss bilden die Ergebnisse der helikoptergestützten Messkampagnen. Dabei wurden die Methoden Magnetik, Elektromagnetik und Gammaspektrometrie verwendet. Auf den Karten sind scheinbarer elektrischer Widerstand bei 900 und 3600 Hz, die scheinbare Tiefe der Leiter, die Totalintensität des Magnetfeldes, die Zählraten im Kalium-, Uran- und Thoriumfenster sowie ihre Verhältnisse dargestellt. Insgesamt werden in diesem Kapitel 156 Karten präsentiert (nach Regionen Niederösterreich, Oberösterreich, Burgenland, Steiermark und Kärnten geordnet). Im weiteren findet man auch hier eine qualitative Bewertung der Anomalien in Tabellenform.

Das Buch der Herren W. Seiberl und H. Heinz enthält eine Fülle von ausserordentlichem Datenmaterial in einer klaren und übersichtlichen Form. Erwähnenswert ist auch die ausführliche Bibliographie. Neben den Spezialisten der Aerogeophysik kann es auch den an der österreichischen Geologie interessierten Personen empfohlen werden. Sie werden darin viele nützliche Resultate finden.

E. Klingelé

Vorstand der Naturforschenden Gesellschaft Zürich 1991/92

Präsident: Prof. Dr. Stephan Müller
Inst. für Geophysik ETH
ETH Hönggerberg
8093 Zürich, Tel. 377 26 10

Vizepräsident: Prof. Dr. Klaus Itten
Geogr. Inst. Universität
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 51 60

Sekretär: Dr. Heinrich Bührer
EAWAG/ETH
Überlandstrasse 133
8600 Dübendorf
Tel. 823 51 85

Quästor: Ferdinand Stutz
Finanz- und Treuhand AG
Chrottenbuckstrasse 10
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 23 58

Redaktor: Prof. em. Dr. H. H. Bosshard
Im Stucki 5
8450 Andelfingen
Tel. 052 41 19 61

Archivar: Dr. Markus Schnitter
Zumikerstrasse 20
8700 Küsnacht
Tel. 910 56 91

Beisitzer: Prof. Horst Dargel
Im Ahorn 15
8125 Zollikerberg
Tel. 391 68 89

Prof. Dr. Erich Dubler
Anorganisch-chemisches Institut
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 46 21

Prof. Dr. Rolf Nöthiger
Zoologisches Inst.
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich, Tel. 257 48 61

PD Dr. Irene Tobler-Kost
Pharmakol. Inst. Universität
Gloriastrasse 32
8006 Zürich, Tel. 257 26 82

PD Dr. med. Eugen Schönle
Universitäts-Kinderklinik
Steinwiesstrasse 75
8032 Zürich, Tel. 259 71 11

PD Dr. Hannes Schüepp
Eidg. Forschungsanstalt
für Obst-, Wein- und
Gartenbau
8820 Wädenswil
Tel. 783 63 15

Dr. Rosmarie Waldner
Stuhlenstrasse 23
8123 Ebmatingen
Tel. 980 11 38

Vertreter in der Kommission der Zentralbibliothek:
Prof. H. Dargel

Vertreter im Senat der SNG:
Dr. Heinrich Bührer

Rechnungsrevisoren:
Werner Kübler
Sägegasse 8
8702 Zollikon
Tel. 391 55 83

Mario Stolz
Bundtacherstrasse 5
8127 Forch, Tel. 980 07 80

Stellvertreter: Dr. Andreas Fischer
Grundwiesstrasse 10
8700 Küsnacht
Tel. 910 69 26

136. Jahrgang 1991

VIERTELJAHRSSCHRIFT
ER NATURFORSCHENDEN
ESELLSCHAFT IN ZÜRICH

unter Mitwirkung von
Stephan Müller, Erich Dubler und Eugen Schönle
herausgegeben von
Hans Heinrich Bosshard

NGZ Naturforschende Gesellschaft in Zürich

Inhaltsverzeichnis

Beiträge

Streiflichter aus Wissenschaft und Forschung

Berichte und Notizen

Nekrolog

Buchbesprechungen

Neujahrsblatt auf das Jahr 1992 (194. Stück)

Philippe Matile: Vom Ergrünen und Vergilben der Blätter, 46 Seiten, Preis Fr. 20.–

Hinweise für Autoren

1 Manuskript

1.1 Das Manuskript muss *druckreif* in Maschinenschrift (1½zeilig auf einseitig beschriebenem Papier vom Format A4) eingereicht werden. Mit Rücksicht auf das Druckverfahren können Änderungen gegenüber dem Manuskript bei der Korrektur nicht mehr ausgeführt werden. Die Korrektur muss sich deshalb auf die Beseitigung reiner Setzfehler beschränken. Nachträgliche Wort- oder Textänderungen sowie Änderungen von Formeln oder Bildern müssen dem Verfasser berechnet werden.

1.2 Die Manuskripte sind wie folgt zu gliedern:
- Titel der Arbeit in Deutsch (Französisch oder Englisch)
- Vornamen und Namen der (oder des) Verfasser(s)
- Zusammenfassung/Résumé/Summary (100–200 Wörter)
- Titel der Arbeit in Englisch (oder Deutsch)
- Summary/Zusammenfassung (100–200 Wörter)
- Text in Abschnitte unterteilt, mit kennzeichnenden Untertiteln, die nach der Dezimalklassifikation numeriert sind.
- Literatur
- Vollständige Adresse der (oder des) Verfasser(s)

1.3 Einzelheiten zum Text

1.31 Eigennamen sind im Text nicht hervorzuheben.
Hervorhebungen einzelner Wörter (wissenschaftliche Gattungs- und Artnamen) sind durch Kursivsatz möglich. Die betreffenden Wörter sind grün zu unterstreichen.

1.32 Fussnoten sind unten auf die gleiche Manuskriptseite zu schreiben und fortlaufend zu numerieren; im Text sind sie durch die entsprechende hochgestellte Ziffer zu kennzeichnen.

1.33 Tabellen sind, unabhängig von den Bildern, fortlaufend zu numerieren, mit einer vollständigen Überschrift in Deutsch und Englisch zu versehen und jeweils einzeln auf einem Blatt dem Manuskript beizulegen. Im laufenden Text muss der Hinweis auf eine Tabelle lauten: (Tabelle ...).

1.4 Zitierung von Literatur:
Im laufenden Text sollen Literaturstellen wie folgt aufgeführt werden: (K. P. Poper, 1976).
Die zitierte Literatur soll am Schluss des Textes in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt werden, wobei aus Gründen der Einheitlichkeit folgende Form zu wählen ist:
Zeitschriften-Beiträge: Autor, Initialen, Jahreszahl, Beitragstitel, Zeitschriftenabkürzung, Bandzahl, Heft und Seiten.
Z. B. Roux, D. C. (1958), Biogenesis of Condensed Tannins from Leucoanthocyanins. Nature *181* (4621): 1454–1456.
Bücher, z. B.: Portmann, A. (1973), Alles fliesst. Rückblick und Ausblick eines Biologen. Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 46 Seiten.

2 Bilder

2.1 Die Bilder sollen arabisch numeriert und dem Manuskript stets lose beigegeben werden. Hinweise (Bild . . .) sind im Text einzufügen, und am Rand des Manuskriptes ist anzugeben, wo die Bilder im Druck erscheinen sollen.
Für photographische Bilder sind scharfe und kontrastreiche Photoabzüge in Schwarzweiss erforderlich; sie können einzeln oder in Tafeln zusammengestellt gedruckt werden. Die Tafel-Vorlagen sollen in A4-Format gehalten werden; die Bild-Nummern sind in der unteren rechten Ecke mit Lettraset einzusetzen.
Strichbilder (Zeichnungen, Diagramme, Schemata usw.) müssen eine klare Beschriftung in Lettraset enthalten. Die notwendige Verkleinerung erfordert weitgehende Vereinfachung der Darstellung. Unterschiedliche Strichdicken sind deutlich zu kennzeichnen.

2.2 Die Bildunterschriften sollen in deutscher und englischer Sprache auf einem gesonderten Blatt dem Manuskript beigefügt sein. Bei mikroskopischen Bildern ist die jeweilige Vergrösserung am Schluss der Unterschrift anzugeben, z. B.: 7500 : 1.
Alle in den Bildern, insbesondere in den Diagrammen angegebenen Kurzbezeichnungen, Buchstaben oder Symbole müssen, sofern sie nicht im Bild selbst erklärt sind, in den Bildunterschriften erklärt werden.

Sonderdrucke

Von jedem Beitrag werden 25 Sonderdrucke unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Weitere Sonderdrucke können gegen Berechnung geliefert werden; die gesamte Anzahl ist bei Rücksendung der Fahnenkorrektur anzugeben.